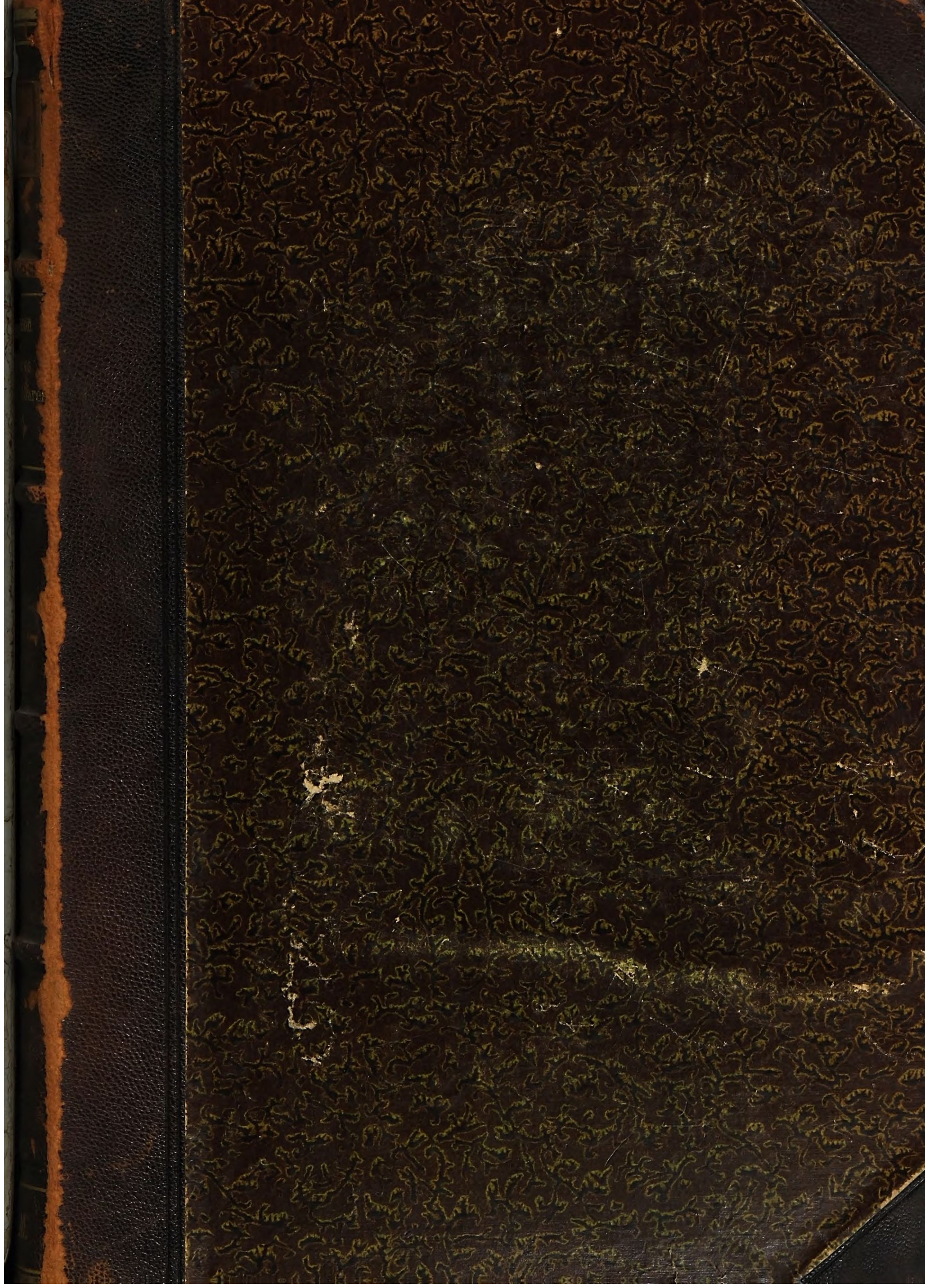




Thompson

Math. A.
239 I

<36632946840010

S

<36632946840010

Bayer. Staatsbibliothek

Ueber
Sichtbares und unsichtbares Licht.

Eine Reihe von Vorlesungen

gehalten

an der Royal Institution von Gross-Britannien

von

Silvanus P. Thompson,

D. Sc., F.R.S., M.R.J.,

Professor der Physik und Director am „City and Guilds Technical College“ zu London.

Deutsche Ausgabe

von

Professor Dr. Otto Lummer,

Mitglied der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Charlottenburg.

Mit ca. 150 in den Text gedruckten Abbildungen und 10 Tafeln.

Halle a. S.

Verlag von Wilhelm Knapp.

1898.

17/5.98

3015

Verlag von Wilhelm Knapp in Halle a. S.

Die
Dynamoelektrischen Maschinen.

Ein Handbuch
für Studierende der Elektrotechnik.

Von

Silvanus P. Thompson,

Direktor und Professor der Physik an der technischen Hochschule
der Stadt und Gilden von London.

Fünfte Auflage.

Mit 520 in den Text gedruckten Abbildungen und 19 grossen Figurentafeln.

Preis Mk. 24,—.



Mehrphasige
Elektrische Ströme
und
Wechselstrommotoren.

Von

Silvanus P. Thompson,

Direktor und Professor der Physik an der technischen Hochschule
der Stadt und Gilden von London.

Autorisirte deutsche Uebersetzung von **K. Strecker.**

Mit 171 in den Text gedruckten Abbildungen und 2 Tafeln. — Preis Mk 12,—.

Ueber
Sichtbares und unsichtbares Licht.

Eine Reihe von Vorlesungen

gehalten

an der Royal Institution von Gross-Britannien

von

Silvanus P. Thompson,

D. Sc., F.R.S., M.R.J.,

Professor der Physik und Director am „City and Guilds Technical College“ zu London

Deutsche Ausgabe

von

Professor Dr. Otto Lummer,

Mitglied der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt zu Charlottenburg.

Mit ca. 150 in den Text gedruckten Abbildungen und 10 Tafeln.



Halle a. S.

Verlag von Wilhelm Knapp.

1898.



Vorwort.

Zwei Erwartungen werden von dem Vortragenden gehegt, welcher einen Cursus von Weihnachts-Vorlesungen an der Royal Institution hält. Erstens, dass seine Ausführungen soweit als nur möglich durch Experimente anschaulich gemacht werden. Zweitens soll trotz der populären Form, in welcher die wissenschaftlichen Thatsachen und Principien vorzutragen sind, jede Vorlesung einen gewissen Anklang an das Moderne haben und Bezug nehmen auf den neuesten Fortschritt der Wissenschaft.

Aus diesem Grunde wagte der Vortragende in einigen Punkten von der früher gebräuchlichen Darstellung abzuweichen, sodass vielleicht solche Leser etwas seltsam berührt werden, welche ihre optischen Kenntnisse aus einem älteren, auf einer engeren Basis aufgebauten Lehrbuche der Optik geschöpft haben. Die in der ersten Vorlesung entwickelten Ideen entsprangen der Ueberzeugung, dass die altherwürdige Lehrmethode der geometrischen Optik — eine Methode, bei welcher die wellenartige Natur des Lichtes standhaft ignorirt wird — von Grund aus falsch ist. Für die Studenten und Lehrer der Optik wurde der ersten Vorlesung ein Anhang angefügt, in welchem die neueren Ideen etwas ausführlicher entwickelt sind. Die zu den übrigen Vorlesungen gehörigen Anhänge sollen lediglich einige Lücken ausfüllen, welche die Darstellung aufweist.

Seitdem die elektro-magnetische Natur aller Aetherwellen zur Genüge nachgewiesen ist, bedarf es keiner Entschuldigung, dass in der fünften Vorlesung einige Experimente vorgeführt werden, welche jene Ansicht stützen. Die Thatsache, dass diese fundamentalen Experimente ohne grosse Complication der Gedanken oder der Sprache

auseinandergesetzt werden können, ist wohl der beste Beweis dafür, dass experimentelle Demonstrationen ein wesentliches Hülfsmittel bei der Einführung in die Lehren der Wissenschaft sind.

Viele der zu entwickelnden Ideen, z. B. die von der Polarisation des Lichtes, werden meist für sehr schwer gehalten; dabei liegt die Schwierigkeit nicht in der Materie selbst begründet, sondern vielmehr in der Art der Darstellung. Durch langjährige Erfahrung hat der Autor gefunden, dass die hauptsächlichsten Phänomene der Polarisation selbst von Personen geringen Intellects — ja sogar von Kindern — verstanden werden, vorausgesetzt, dass der Stoff in einer modernen, von pedantischen Ausdrücken befreiten Weise vorgetragen, und durch geeignete Modelle erläutert wird. Aehnliche Bemerkungen gelten für andere Disciplinen der Optik, z. B. für die Interferenz und Beugung, auf welche in diesen Vorlesungen nur hingedeutet wird. Viele Zweige sind bei einer so kurzen Darstellung ganz und gar ausgelassen. Dahin gehört die Lehre von der Spectralanalyse, die Construction und Theorie optischer Apparate und der grössere Theil der Farbenlehre. Es wurde gar kein Versuch gemacht, diese Materien in den Vorlesungscursus mit einzuschliessen; ihre Vernachlässigung bedarf keiner Entschuldigung. Welches auch der Werth dieser Vorlesungen sein mag, jedenfalls hängt derselbe ab von dem, was sie enthalten und nicht von dem, was sie nicht enthalten.

London, Januar 1897.

Vorwort des Uebersetzers.

Der Aufforderung des Autors, seine an der Royal Institution zu London gehaltenen Vorlesungen über das Licht zu übersetzen, leistete ich um so lieber Folge, als ich mich selbst mit der Absicht trug, meinen vor der Berliner Polytechnischen Gesellschaft gehaltenen Vortrag „Licht und Leuchten“ (abgedruckt im Polytechn. Centralblatt 1897) in erweiterter Form einem grösseren Leserkreise zugänglich zu machen. In den letzten Jahren sind gerade auf dem Grenzgebiet der Optik und Elektrizität so grosse Fortschritte gemacht worden, dass eine gemeinverständliche Darstellung dieser neueren Errungenschaften eine fühlbare Lücke in der vorhandenen Litteratur ausfüllt.

In dem Bestreben, den Darlegungen des Autors auch in der deutschen Ausgabe einen vor allem klaren und leicht verständlichen Ausdruck zu geben, habe ich mich mehr an den Sinn, als an die Worte des Textes geklammert. Durch Weglassung einiger nur für den Engländer interessanten Stellen und durch Hinzufügung von Anmerkungen suchte ich dem Standpunkt deutscher Leser, deutscher Forschung und meinem eigenen Standpunkt gerecht zu werden.

Um den zusammenhängenden Charakter der Vorlesungen mehr hervorzuheben, habe ich, abweichend vom Original, die zum Theil wissenschaftlichen Anhänge zu den einzelnen Vorlesungen an das Ende des Buches gebracht. Auch glaubte ich aus den Anhängen das streichen zu sollen, was populär doch nicht recht verständlich gemacht werden kann. Dagegen ist die im ersten Anhang gegebene und für wissenschaftlich gebildete Leser berechnete Darstellung der geometrischen Optik im Sinne der Wellenlehre trotz des populären Charakters der Vorlesungen beibehalten worden, da auch ich der

Meinung bin, dass die Wellenlehre des Lichtes bei der Ableitung der Abbildungsgesetze mehr Berücksichtigung als bisher verdient. Ich verweise in dieser Beziehung auf meine Darstellung der Abbildungslehre im Müller-Pouillet'schen Lehrbuch der Physik (9. Aufl. Bd. II, Optik, Braunschweig, 1894—1897), wo ich den Zusammenhang zwischen der Bildentstehung im Sinne der geometrischen Optik (Strahlentheorie) und der Wellenlehre des Lichtes ausführlich behandelt habe.

Charlottenburg, Ostern 1898.

Inhalts-Verzeichniss.

Erste Vorlesung.

Licht und Schatten.

Wie Lichtwellen fortschreiten. — Experimente mit der Wellenrinne. — Wie Schatten entstehen. — Wie Lichtwellen convergent und divergent gemacht werden. — Messung der Helligkeit von Lichtquellen. — Reflexion des Lichtes an Spiegeln. — Entstehung optischer Bilder. — Regelmässigkeit und Unregelmässigkeit der Reflexion. — Diffuse Reflexion an Papier und rauhen Oberflächen. — Vielfache Bilder. — Brechung des Lichtes durch Linsen. — Das Auge ein optischer Apparat. — Einige merkwürdige optische Experimente. — Umkehrung von Bildern. — Der magische japanische Spiegel. — Englische magische Spiegel S. 1—42.

Zweite Vorlesung.

Das sichtbare Spectrum und das Auge.

Farben und Wellenlängen. — Regenbogenfarben. — Das sichtbare Spectrum. — Das durch Prismen erzeugte Spectrum. — Das durch Gitter erzeugte Spectrum. — Zusammensetzung des weissen Lichtes. — Experimente über Farbenmischung. — Farben-Analyse. — Blau und Gelb giebt Weiss, nicht Grün. — Complementär-Farben. — Contrastfarben hervorgerufen durch Müdigkeit des Auges. — Wirkungen in Folge der Dauer eines Lichteindrucks. — Zootrop. — Animatograph S. 43—65.

Dritte Vorlesung.

Polarisation des Lichtes.

Bedeutung der Polarisation. — Herstellung polarisirten Lichtes. — Polarisations-Modelle. — Polarisatoren aus Glas, Kalkspath und Turmalin. — Wie ein jeder Polarisator das polarisirte Licht auslöscht. — Eigenthümlichkeiten der Krystalle. — Gebrauch des polarisirten Lichtes, um falsche Edelsteine zu entdecken. — Rubine, Saphire und Amethyste. — Polarisation durch Doppelbrechung des Lichtes. — Merkwürdige Farbeffecte im polarisirten Lichte, hervorgebracht durch Einschalten dünner farbloser Krystallplatten zwischen Polarisator und Analysator. — Wirkungen, hervorgebracht beim Glas durch Druck und durch Erhitzen . . . S. 66—102.

Vierte Vorlesung.

Das unsichtbare Spectrum (ultravioletter Theil).

Das Spectrum erstreckt sich dem Auge unsichtbar zu beiden Seiten des sichtbaren Spectrums. — Zur Seite des rothen Endes befinden sich die langen Wellen, welche die Körper erwärmen, aber nicht erleuchten. — Man bezeichnet sie als Wärmewellen oder auch als ultraroth Wellen. — Zur Seite des blauen Endes des sichtbaren Spectrums befinden sich die kurzen Wellen, welche eine chemische Wirkung auf die Körper ausüben und actinische oder ultraviolette Wellen genannt werden. — Wie man das unsichtbare ultraviolette Licht von den sichtbaren Strahlen absondert. — Wie man das unsichtbare ultraviolette Licht sichtbar macht. — Gebrauch von Fluoreszenzschirmen. — Reflexion, Brechung und Polarisation des ultravioletten Lichtes. — Luminescenz, Fluorescenz und Phosphorescenz. — Wie man Leuchtfarbe herstellt. — Experimente mit phosphorescirenden Körpern. — Andere Eigenschaften des unsichtbaren ultravioletten Lichtes. — Seine Eigenthümlichkeit elektrische Körper zu entladen. — Photographische Wirkung des sichtbaren und unsichtbaren Lichtes. — Die farbige Photographie. — Die Reproduction der natürlichen farbigen Objecte durch die sogenannte Dreifarbenphotographie. — Ives' Photochromoskop. — Lippmanns Entdeckung der Photographie in natürlichen Farben S. 103—126.

Fünfte Vorlesung.

Das unsichtbare Spectrum (ultrarother Theil).

Wie man das unsichtbare ultraroth Licht vom sichtbaren trennt. — Experimente über die Absorption und Transmission des unsichtbaren ultraroth Lichtes. — Es wird abgeschnitten durch das durchsichtige Glas, aber hindurchgelassen vom undurchsichtigen Ebonit. — Gebrauch des Radiometers. — Gebrauch der Thermosäule und des Bolometers. — Farben als „Wärmeindicator“. — Experimente über Reflexion, Brechung und Polarisation des unsichtbaren ultraroth Lichtes. — Entdeckung der Fortpflanzung elektrischer Wellen durch H. Hertz. — Hertz'sche Wellen sind in Wirklichkeit Wellen des unsichtbaren Lichtes von relativ bedeutender Grösse. — Experimente über die Eigenschaften der Hertz'schen Wellen; deren Reflexion, Brechung und Polarisation. — Folgerung, dass alle unsichtbaren Lichtwellen in Wirklichkeit elektrische Wellen verschiedener Grösse sind S. 127—159.

Sechste Vorlesung.

Röntgenstrahlen.

Röntgens Entdeckung. — Erzeugung von Licht in luftleer gemachten Röhren durch elektrische Entladung. — Wie man die Luft aus einer Röhre pumpt. — Die Erscheinungen in einer Geisslerschen Röhre. — Die Quecksilber-

Luftpumpe. — Hittorf-Crookessche Röhren. — Eigenthümlichkeit des Kathodenlichtes. — Ablenkung der Kathodenstrahlen durch den Magneten. — Luminescenz und mechanische Effecte. — Lenards Untersuchung über die Kathodenstrahlen in der Luft. — Röntgens Untersuchungen. — Die Entdeckung der X-Strahlen durch ihre Luminescenzwirkungen. — Schatten auf luminescirenden Schirmen. — Durchlässigkeit von Aluminium. — Durchlässigkeit von dichteren Metallen. — Durchsichtigkeit von Fleisch und Leder. — Undurchsichtigkeit von Knochen. — Abwesenheit von Reflexion, Brechung und Polarisation. — Die Eigenschaften der Röntgenstrahlen elektrisirte Körper zu entladen. — Verbesserung der Röntgenröhren. — Speculation über die Natur der Röntgenstrahlen. — Das Sehen des Unsichtbaren S. 160—186.

Anhang zur ersten Vorlesung „ 187—200.

„ „ zweiten „ „ 201—203.

„ „ dritten „ „ 204—206.

„ „ vierten „ „ 207—208.

„ „ fünften „ „ 209—216.

„ „ sechsten „ „ 217—221.

Register „ 222—229.

The first of the year was a very dry one, and the crops were much injured. The weather was very hot, and the ground was very dry. The crops were much injured, and the yield was very small. The weather was very hot, and the ground was very dry. The crops were much injured, and the yield was very small.

The second of the year was a very wet one, and the crops were much injured. The weather was very cold, and the ground was very wet. The crops were much injured, and the yield was very small. The weather was very cold, and the ground was very wet. The crops were much injured, and the yield was very small.

Erste Vorlesung.

Licht und Schatten.

Wie Lichtwellen fortschreiten. Experimente mit der Wellenrinne. Wie die Schatten entstehen. Wie Lichtwellen convergent und divergent gemacht werden. Messung der Helligkeit von Lichtquellen. Reflexion des Lichtes an Spiegeln. Entstehung optischer Bilder. Regelmässigkeit und Unregelmässigkeit der Reflexion. Diffuse Reflexion an Papier und rauhen Oberflächen. Vielfache Bilder. Brechung des Lichtes durch Linsen. Das Auge ein optischer Apparat. Einige merkwürdige optische Experimente. Umkehrung von Bildern. Der magische japanische Spiegel. Englische magische Spiegel.

Aus astronomischen Beobachtungen sowohl wie aus Versuchen im physikalischen Laboratorium geht hervor, dass sich das Licht mit einer Geschwindigkeit fortpflanzt, welche die schnellste Bewegung irgend welcher materiellen Körper bei weitem übertrifft. Stellen Sie sich die schnellste Bewegung irgend eines Körpers auf unserer Erde vor, etwa einen in vollster Eile vorüberbrausenden Schnellzug. Wie weit ist er gekommen, während wir bis zehn zählen? Nehmen wir an, man brauche dazu $5\frac{1}{2}$ Secunden, so hat der Schnellzug in dieser Zeit höchstens 150 Meter zurückgelegt. In derselben Zeit würde ein Geschoss noch weiter geflogen sein. Es giebt aber etwas, das schneller den Raum durchheilt, als irgend ein sich wirklich bewogender Körper. Der Schall z. B. schreitet noch schneller fort. In derselben Zeit würde ein Ton 1830 Meter weit gegangen sein. Sie entgegnen mir, der Ton sei doch nur eine Schwingung der Luft, also eine blosse Luftwelle? Ganz recht! Der Schall besteht aus Luftwellen, oder vielmehr aus einer Reihe von Luftwellen. Wer von Ihnen an dieser Stelle letzte Weihnachten die schönen Vorlesungen Professor M'Kendricks gehört hat, wird diese Thatsache wohl nie wieder vergessen. Stets auch wird er sich des Phonographen erinnern, welcher die mechanische Wirkung einer Luftwelle zu registriren im Stande ist, die gegen die empfindliche Schallplatte trifft.

Diese Weihnachten haben wir uns mit Wellen von ganz anderer Art zu beschäftigen. Während jener $5\frac{1}{2}$ Secunden, in denen ein Expresszug 150 Meter zurücklegt oder innerhalb deren der Schall 1830 Meter weit fortschreitet, legt das Licht eine Million und sechs-

hundertfünfzig Tausend Kilometer zurück! Wie soll ich Ihnen eine Vorstellung geben von der ungeheuren Grösse dieser Entfernung?

Ein Schnellzug, welcher 96,5 Kilometer in einer Stunde zurücklegt, würde jene Strecke von 1 650 000 Kilometern in $17\,098\frac{1}{2}$ Stunden oder in 712 Tagen und $10\frac{1}{2}$ Stunden durchmessen. Nehmen wir an, Sie bestiegen heute Nachmittag 3 Uhr (am 29. December 1896) einen Eilzug, und der Zug führe nicht nur alle Tage und Nächte, sondern das ganze nächste Jahr, Tag für Tag, und ebenso während des übernächsten Jahres, Monat für Monat, ohne Unterbrechung bis zum 12. December 1898 Morgens 2 Uhr; erst in dieser langen Zeit, also in fast zwei vollen Jahren würden Sie jene $1\frac{1}{2}$ Million Kilometer zurückgelegt haben. Diese ganze Strecke, welche der Zug erst in einem Jahre und elf Monaten durchheilt, durchfliegt das Licht in $5\frac{1}{2}$ Secunden, d. h. während Sie etwa bis zehn zählen.

Aber nicht nur in Bezug auf die Schnelligkeit der Fortpflanzung sind die Lichtwellen verschieden von denen der Schallwellen, sondern auch in Bezug auf die Grösse. Im Vergleich mit den Schallwellen sind die Lichtwellen von ausserordentlich kleiner Dimension. Bekanntlich variirt die Grösse der Schallwellen mit der Höhe des Tones. Das mittlere eingestrichene c des Claviers (c') hat eine Wellenlänge von ungefähr einem Meter und drei Decimetern, während der höchste Ton, welchen Sie singen können, eine Welle von nur $2\frac{1}{2}$ Centimetern Länge besitzt. Ein schriller Pfiff verursacht in der Luft unsichtbare Wellen von nur $1\frac{1}{2}$ Centimeter Länge.

Die Lichtwellen sind im Vergleich hierzu sehr viel kleiner. Die längsten Wellen der verschiedenen Arten von sichtbaren Strahlen, d. h. die rothen Wellen, sind so klein, dass Sie von denselben mehr als 12000 nebeneinander legen können, bis sie die Breite eines Centimeters ausfüllen. Und die Wellen der übrigen Strahlen sind noch kleiner. Wie soll ich Ihnen eine Vorstellung von der Kleinheit dieser winzigen Wellen geben? Welches ist der kleinste Gegenstand, den Sie sich vorstellen können? Die Dicke einer Nadel? Ganz recht; wenn eine Nadel nur $\frac{1}{4}$ Millimeter dick ist, so ist sie doch noch 357mal dicker als eine Welle des rothen Lichtes. Die Dicke eines menschlichen Haares? Gut; wenn die Dicke eines Haares nur den tausendsten Theil eines Centimeters beträgt, so ist dieselbe doch noch 14mal so gross, als die Wellenlänge des rothen Lichtes.

Aus der Thatsache, dass die Lichtwellen so schnell sich ausbreiten und von so winziger Grösse sind, folgen nun einige wichtige Consequenzen. Die erste Folgerung ist die, dass die Schwingungen

dieser kleinen Wellen so schnell aufeinander folgen — Millionen über Millionen in jeder Sekunde —. dass wir kein Mittel haben, ihre Schwingungszahl experimentell zu bestimmen. Wir können sie lediglich durch Berechnung finden.

Eine andere Folgerung ist die, dass es schwer sein wird nachzuweisen, ob sich das Licht wirklich in Form von Wellen fortpflanzt. Drittens folgt aus der Kleinheit der Wellen, dass sie nicht wie die grossen Schallwellen um die Ecke gehen und demnach die hintere Seite eines für sie undurchdringlichen Gegenstandes nicht erreichen.

Zweifellos haben Sie schon oft die Wellen auf der See oder auf einem Teiche beobachtet und bemerkt, wie die auf der Oberfläche fortschreitenden Wellen beim Auftreffen auf ein Hinderniss, z. B. auf einen Stein, sich theilen, bei demselben vorbeimarschiren, ihn umzingeln, um sich hinter demselben wieder zu vereinigen. Treffen Lichtwellen ein Hinderniss von gewöhnlichen Dimensionen, z. B. ein Blatt Papier, so laufen sie nicht um dasselbe herum, noch vereinigen sie sich hinter demselben wieder, im Gegentheil, das Papierblatt wirft einen dunklen Schatten hinter sich. Würden die Lichtwellen in den Raum hinter dem undurchsichtigen Gegenstand eindringen, so wäre dieser Raum nicht dunkel, sondern hell. Dieses Eindringen der Wellen in den geometrischen Schattenraum hängt in letzter Instanz jedoch lediglich von dem Grössenverhältniss zwischen Wellenlänge und Hinderniss ab. Meereswellen werden sich hinter einem Felsen ungestört fortpflanzen, wenn dessen Ausdehnung die Länge einer Meereswelle nicht wesentlich überschreitet.¹⁾ Stellen Sie sich aber einen steinernen Wellenbrecher (eine Mole) vor, dessen Ausdehnung die der Meereswelle um das Vielfache übertrifft, so verharrt, wie Sie sich erinnern, das Wasser hinter demselben in friedlicher Ruhe, wenn auf der vorderen Seite die See auch noch so mächtig braust; in diesem Sinn wirft der Wellenbrecher einen Schatten.

Und so ist es auch mit den Schallwellen. Die meisten Gegenstände sind im Vergleich zur Grösse der Schallwellen nicht unendlich gross; in Folge dessen dringen die Schallwellen beim Auftreffen auf einen Gegenstand auch in den Raum hinter demselben und die

1) „Die Wellenlänge“ ist gleich der Distanz vom Kamm der einen Welle bis zum Kamm der nächstfolgenden. Diese Strecke mag auf der See 20 Meter und mehr betragen; auf einem Teich vielleicht nicht mehr als einige Centimeter.

Gegenstände werfen keinen, wenigstens keinen deutlichen, scharf begrenzten Schallschatten. Spielt eine Musikbande auf der vorderen Seite eines Hauses, so hören Sie gleichwohl das Spiel, auch wenn Sie sich hinter das Haus begeben. Die Töne gehen um die Ecke des Hauses und dringen in den dahinter befindlichen Raum. Bei schärferer Beobachtung werden Sie aber finden, dass die langen Wellen der tiefen Töne einer Trommel oder Posaune im Klang besser zu hören sind, als die kleinen Wellen der Flöte oder vom Piccolo. Und Lord Rayleigh hat in diesem Saale oft gezeigt, dass die noch kleineren Schallwellen eines recht schrillen Piffes in noch geringerem Maasse in den Raum hinter den Gegenstand eindringen. Sie erhalten einen um so schärferen Schatten, je kleiner die Länge der Wellen im Vergleich zur Grösse des Hindernisses ist.

Sie werden mir mit Recht einwenden, dass, falls diese Darlegung richtig ist, auch die Lichtwellen keinen Schatten werfen dürften, wenn man ihnen nur Gegenstände in den Weg stellt, die klein genug sind, z. B. feine Nähnadeln oder menschliche Haare. In der That tritt dieser Fall ein, so unwahrscheinlich es auch erscheinen mag und der Lichtschatten verschwindet thatsächlich, wenn man den Versuch in richtiger Weise anordnet.

Wir brauchen nur Licht von einem einzelnen Punkt auf ein feines Haar fallen zu lassen und wir erhalten keinen scharf begrenzten dunklen Schatten mehr; im Gegentheil erscheinen die Ränder des Schattens verwaschen und mit eigenthümlichen Franzen versehen, während Licht gerade mitten im Schatten sich bemerkbar macht, welches ohne Zweifel nur von den Wellen herrühren kann, die am Gegenstand vorbeigegangen und sich im Raum hinter demselben ausgebreitet haben.

Jedoch wollen wir diese besonderen Fälle der Lichtausbreitung, welche lediglich bei grosser Vorsicht unter Verwendung winziger Objecte in die Erscheinung treten, hier ausser Acht lassen und nur die im Allgemeinen auftretenden Erscheinungen betrachten. Die gewöhnlichen, mit Hülfe starker Lichtquellen erzeugten Schatten sind scharf begrenzt, und im Allgemeinen verlaufen die Lichtwellen so, als ob sie nicht um die Ecke zu gehen im Stande seien, beziehentlich sich innerhalb des geometrischen Schattens der Körper ausbreiten könnten, sondern sie pflanzen sich einfach in geraden Linien fort.

Lassen Sie mich versuchen, Ihnen das allgemeine Princip der Wellenfortpflanzung zu demonstrieren, indem ich mich der Wellenrinne

(Fig. 1) bediene,¹⁾ auf deren Oberfläche ich nach Belieben Wellen hervorbringen kann. Eine geeignet aufgestellte Bogenlampe wirft die Schatten der Wellen auf einen schräg gestellten durchscheinenden Schirm. Sie sehen, wie die Wellen sich vom Punkt der Erregung in concentrischen Kreisen ausbreiten, wobei jeder Kreis sich erweitert und eine Welle der andern in einer ganz bestimmten Distanz folgt. Diese Distanz ist es, welche wir als Wellenlänge bezeichnen.

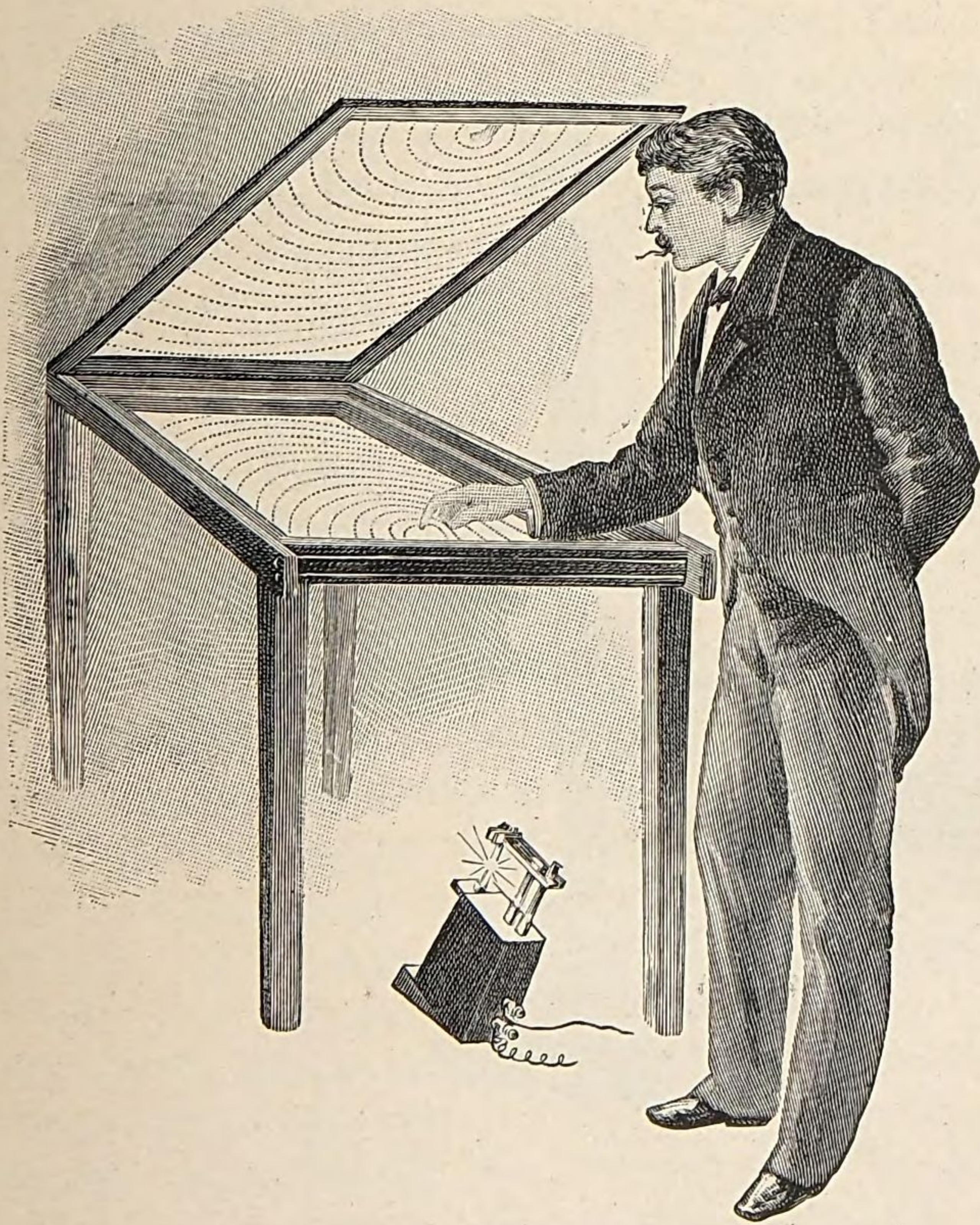


Fig. 1.

Wenn ich meine Fingerspitzen benutze, um eine Erregung zu erzeugen, so sehen Sie die Wellen nach allen Richtungen in gleichmässiger Geschwindigkeit fortschreiten. Jede Wellenlinie oder Wellenfront ist daher ein Kreis. Benutze ich jedoch ein gerades hölzernes

1) Wellenrinnen zur Illustration der Fortpflanzung von Wellen sind schon lange bekannt. Kleine Modelle derart sind zu verschiedenen Zeiten von Professor Tyndall gebraucht worden. (Siehe auch Professor Poynting, F. R. S., in Nature, 29. Mai 1884, S. 119).

Lineal um die Erregung hervorzubringen, so entstehen geradlinige Wellen, von denen eine der anderen in paralleler Richtung folgt. Wir können diese Wellen als ebene bezeichnen zum Unterschied von denen gekrümmter Natur. Halten Sie fest, wie die Wellen vorwärtsschreiten, jede von der nächstfolgenden um eine ganz bestimmte Strecke entfernt.

Haben Sie aber die Wellen auf einem Teiche mit Sorgfalt be-

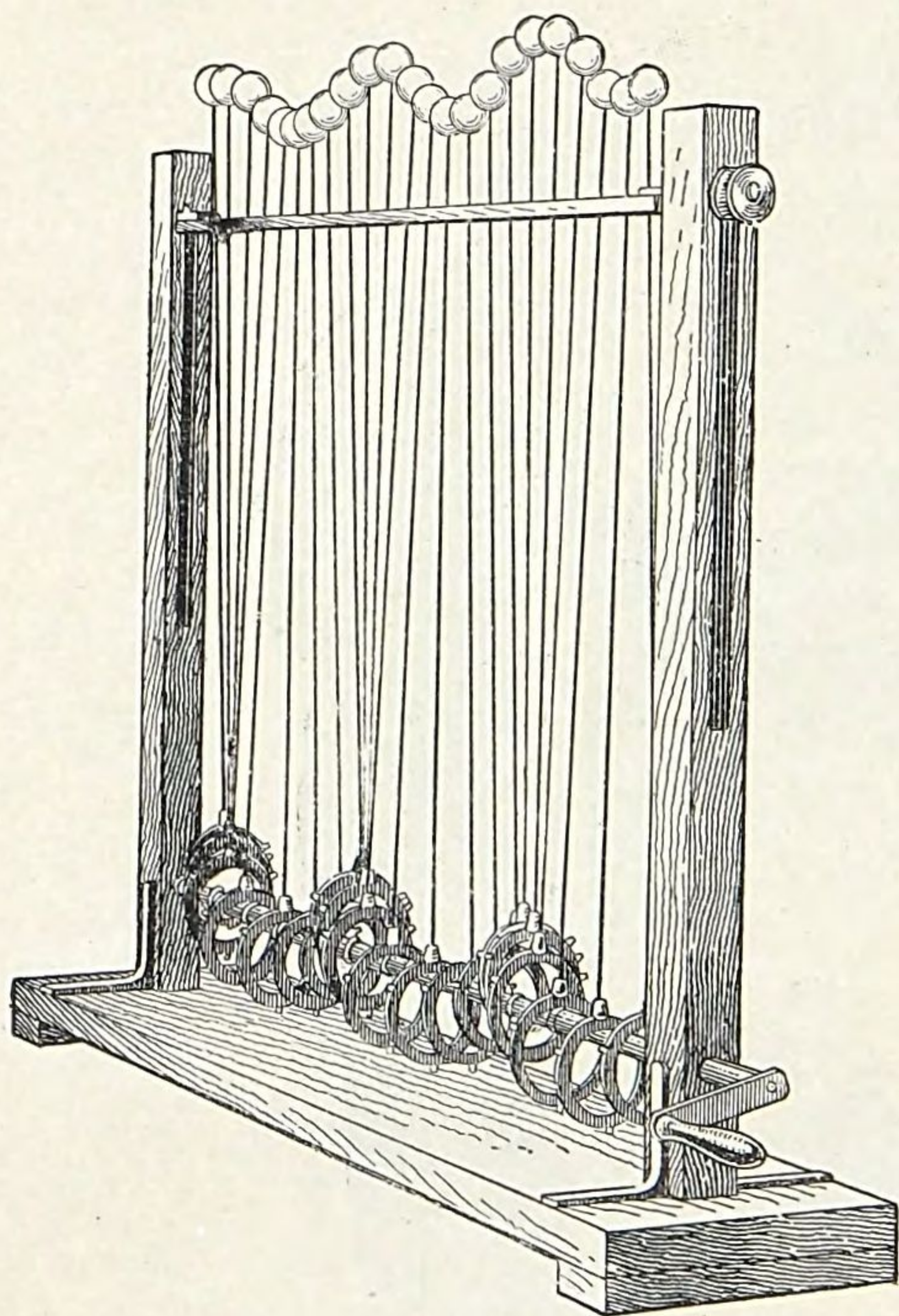


Fig. 2.

obachtet, so wissen Sie auch, dass, obgleich die Wasserwellen vorwärtsschreiten, das Wasser selbst dennoch keine fortschreitende Bewegung hat, sondern sich nur hebt und senkt, sobald eine Erregung darüber hinschreitet. Diese Thatsache ist sehr einfach zu beweisen. Ich werfe ein Stück Kork in das Wasser. Bewegte sich das Wasser mit den Wellen vorwärts, so würde auch das Korkstückchen sich fortbewegen. Aber nein; das Stückchen Kork reitet gleichsam auf dem Wasser und bewegt sich auf- und abwärts, ohne seinen Platz zu wechseln. Nur die Bewegung des Wassers schreitet längs der Oberfläche vorwärts, das Wasser selbst schwingt

hin und her oder besser auf und nieder, aber es bleibt jedes Wassertheilchen an seiner Stelle.

Nachdem Sie dies erkannt haben, werden Sie auch leicht die beiden Arten der Bewegung voneinander unterscheiden können, die scheinbare der Wellen längs der Oberfläche und die wirkliche Bewegung der Wassertheilchen; letztere ist stets oscillatorischer Natur.

Hier habe ich ein Modell einer Wellenbewegung (Fig. 2), welches Ihnen den Unterschied beider Bewegungsarten noch deutlicher machen wird. An der Spitze einer Reihe von Stäben sind kleine weisse Kugeln befestigt; durch Drehen einer Kurbel gebe ich den Stäben eine

oscillatorische Bewegung auf- und abwärts. Keine der weissen Kugeln hat eine fortschreitende Bewegung; vielmehr führt jede nur eine kreisförmige Bewegung an ihrem Platze aus. Dennoch ist der Effect beim Drehen der Kurbel derselbe, als ob sich eine Welle oder vielmehr eine ganze Reihe von Wellen fortbewegte.

Die Richtung, in welcher die Wellen fortschreiten, ist senkrecht zur Ebene, in welcher die Kugeln sich bewegen. Die Länge von Berg zu Berg einer Welle ist ungefähr 10 cm. Die Geschwindigkeit, mit welcher sich die Wellen fortpflanzen, hängt hier natürlich von der Geschwindigkeit ab, mit welcher ich die Kurbel des Apparates drehe. Die Amplitude der Verschiebung jeder Kugel beträgt dabei nicht mehr als $2\frac{1}{2}$ cm auf- und abwärts gerechnet vom Centrum des von jeder Kugel zurückgelegten Kreises aus.

Vielleicht vermögen Sie sich jetzt eine Vorstellung zu machen von den winzigen Lichtwellen, welche in Reih und Glied so eng sich fortbewegen, dass 15 000 oder 20 000 auf einen Centimeter gehen und welche in einer Secunde 300 000 Kilometer zurücklegen.

Zwei Principien lassen Sie uns nun betrachten, welche erst das richtige Verständniss für das Verhalten der Lichtwellen ermöglichen.

Erstens pflanzen sich die Wellen immer¹⁾ im rechten Winkel zur eigenen Frontlinie fort. Aehnlich bewegt sich eine Reihe Soldaten, ein jeder in einer Richtung senkrecht zur Front, in welcher sie aufgestellt sind. Genau so machten es, wie Sie sich erinnern werden, die Wasserwellen auf dem Wellenteich.

Das zweite Princip sagt aus, dass jeder Punkt irgend einer Wellenfront als eine neue Quelle oder Wellencentrum angesehen werden kann, von welchem sich ebenfalls Wellen in concentrischen Kreisen ausbreiten. Blicken Sie auf Fig. 3. Wenn in P eine Erregung entsteht, so breiten sich die Wellen kreisförmig aus und P bildet das Centrum der Wellen. Bringen Sie jetzt in den Weg der Strahlen ein Hinderniss, z. B. einen Schirm S mit einem Loch in seiner Mitte, so werden alle den Schirm treffenden Wellen daselbst aufgehalten, beziehentlich reflectirt, mit Ausnahme jenes kleinen Wellenzuges, welcher gerade die Oeffnung des Schirmes erreicht. Dieses Wellenstückchen dringt in den Raum hinter dem Schirm,

1) „Immer“ soll hier heissen: in isotropen Medien, d. h. in Gasen, flüssigen und nicht krystallinischen Mitteln. In Krystallen, bei denen die elastischen Kräfte in den verschiedenen Richtungen eine verschiedene ist, können auch Wellen entstehen, welche schief zur Fortpflanzungsrichtung marschiren.

verbreitet sich aber von der Oeffnung aus in allen Richtungen mit gleicher Geschwindigkeit und giebt so Veranlassung zu einer neuen, wenn auch schwächeren Reihe von kreisförmig verlaufenden Wellen, deren Centrum aber nicht in der ursprünglichen Erregungsstelle P , sondern in der Oeffnung des Schirmes liegt. Auch diesen Vorgang kann ich Ihnen sofort mittels der Wellenrinne illustriren.

Das erste der beiden genannten Principien ist in Wirklichkeit nur die Folge des zweiten in Verbindung mit einem anderen Princip (Interferenz der Wellen), welches die Uebereinanderlagerung der Wellen betrifft. Mit ihrer Hülfe können wir jetzt die

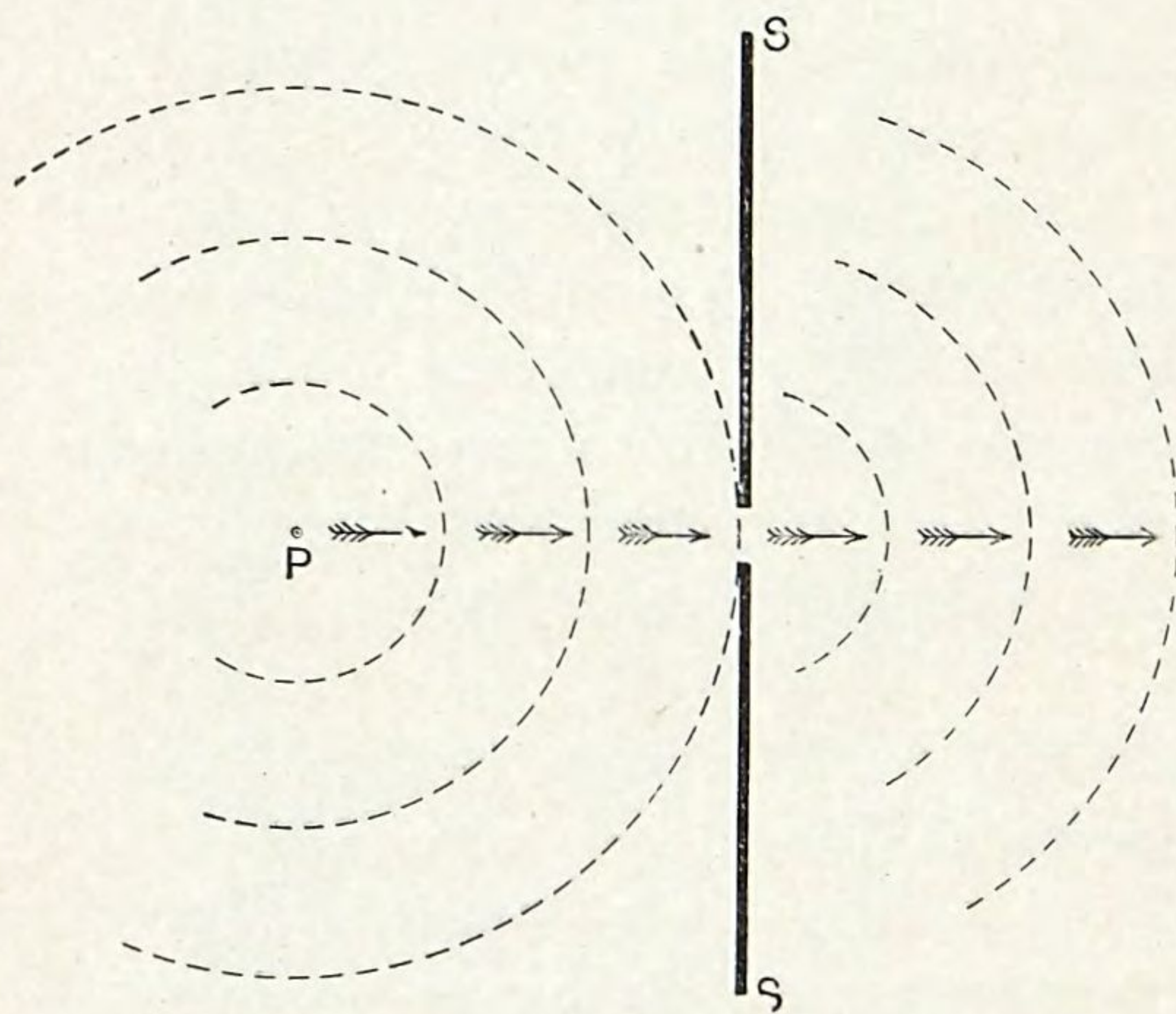


Fig. 3.

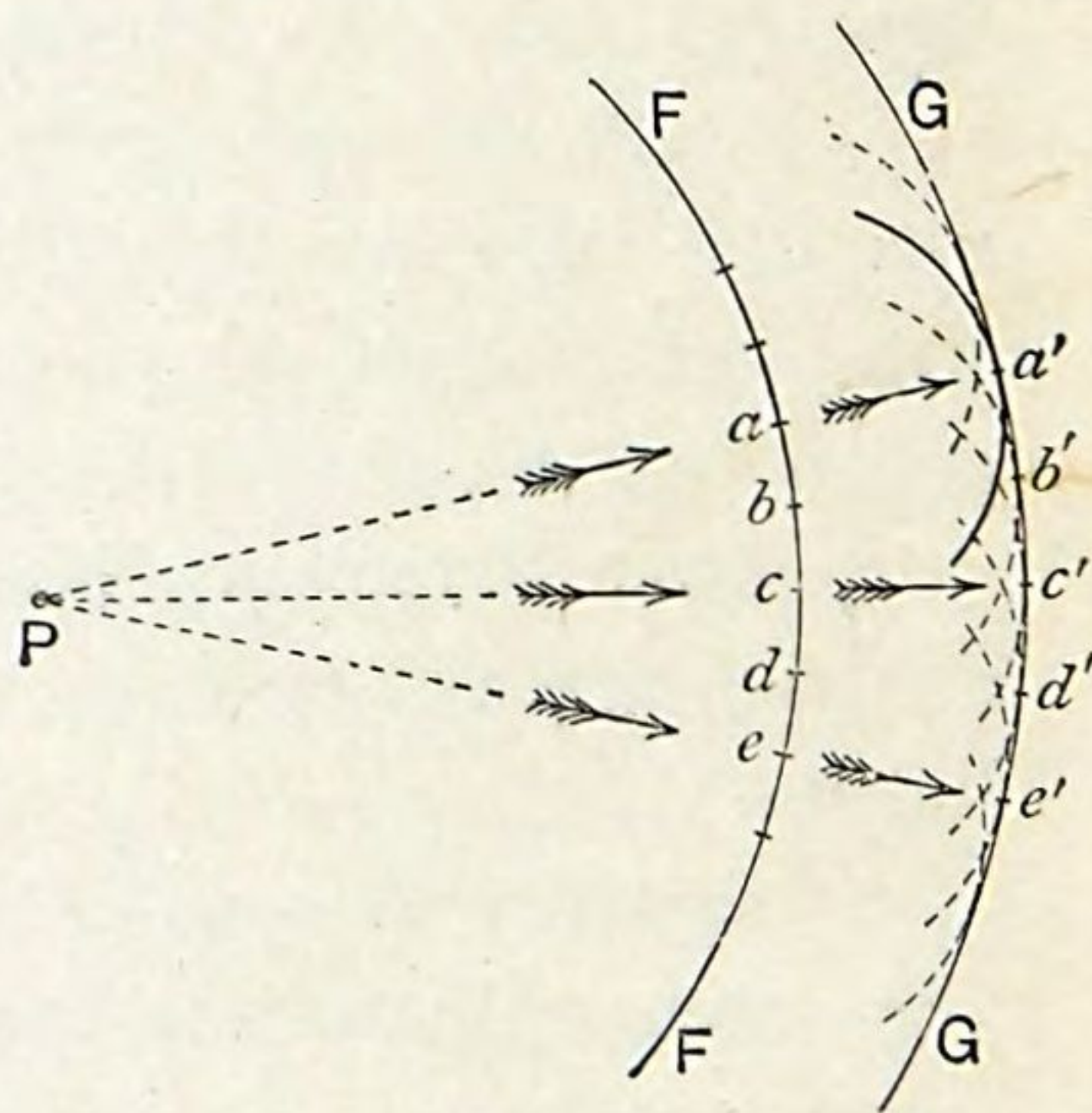


Fig. 4.

Ausbreitung der Wellen bestimmen, wenn wir in jedem Moment die Gestalt der Wellenfront (Wellenfläche) kennen.

Nehmen wir an, wir wüssten, dass in einem gewissen Moment die Front eines Wellenzuges bis zur gekrümmten Linie FF (Fig. 4) gekommen sei, und fragen uns, wo die Welle einen Moment später sich befindet. Da wir die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Wellen kennen, so können wir auch die Zeit berechnen, in welcher eine kleine Strecke, z. B. 2 cm, von den Wellen zurückgelegt wird. Jetzt nehmen wir einen Zirkel, öffnen denselben bis auf 2 cm und beschreiben um irgend einen Punkt, z. B. a der Curve FF ein Stück des Kreisbogens, wie es bei a' geschehen. Bis hierher hätte sich die Erregung fortgepflanzt in jenem kleinen Zeitintervall, wenn das kleine Wellenstück der Welle FF bei a sich allein hätte ausbreiten können.

Aber das Stück bei b wandelt ebenfalls fort, darum müssen wir einen Kreisbogen mit b als Centrum beschreiben, wie es bei b' zu sehen ist; desgleichen einen mit dem Centrum c , einen mit dem Centrum d und so fort, für alle Kreise denselben Radius von 2 cm benutzend. So sehen wir also, dass, wenn alle diese Wellenstückchen anstatt einzeln zu wirken, gemeinschaftlich zu gleicher Zeit wirksam sind, die Einzelwellen sich überlagern und zum Entstehen einer einzigen grossen Welle mit der Wellenfront GG Veranlassung geben. Der Effect ist demnach der gleiche, als ob die Wellenfront FF selbst fortgewandert wäre bis GG mit dem Ausgangspunkt P als Centrum.

Diejenigen Theile der Einzelwellen, welche sich in einer anderen Richtung als in der Richtung der Pfeile fortzubewegen suchen, vernichten sich gegenseitig durch Uebereinanderlagerung, durch Interferenz. So strebt ein Theil der von a ausgehenden Einzelwelle herab zum Punkte c , während ein anderer kleiner Theil der von c ausgehenden Welle aufwärts nach a zielt. Diese seitlichen Ausbreitungen vernichten einander, so dass der Effect derselbe ist, als ob das Wellenstückchen bei c lediglich direct nach c' , das Wellenstückchen bei b direct nach b' und dasjenige bei a direct nach a' marschirt wäre.

Aus diesem Satze folgt auch mit Nothwendigkeit, dass die ein Hinderniss findenden Lichtwellen um die Ecke gehen und in den Schattenraum eindringen müssen, wenn nur die Hindernisse von nahe derselben winzigen Grösse sind, wie die Lichtwellen selbst. Bei der Kleinheit der Lichtwellen im Vergleich zu den schattenwerfenden Objecten ist die Ausbreitung des Lichtes im Inneren des geometrischen Schattens, beziehentlich der Gang der Lichtstrahlen um die Ecke, für gewöhnlich kaum merkbar. Thatsächlich können wir also sagen, das Licht verhält sich so, als ob es sich in gerader Linie fortpflanzte.¹⁾ Nur wenn in den Gang der Lichtstrahlen Gegen-

1) Das ist die wahre Bedeutung für die früher gebräuchliche Ausdrucksweise „das Licht pflanzt sich strahlenförmig fort“. In Wirklichkeit giebt es keine Strahlen. Je mehr man versucht, einen einzelnen Strahl zu isoliren, indem man das Licht zuerst durch eine enge Blende gehen lässt und dann das austretende Strahlenbüschel wiederum durch eine enge Oeffnung schickt, so scheint bei genügender Kleinheit der Oeffnung dieselbe schliesslich Strahlen nach allen Richtungen auszusenden, so, als ob sie selbstleuchtend geworden wäre. Wenn das Wort „Strahl“ in der optischen Wissenschaft beibehalten werden soll, so darf darunter nichts anderes verstanden werden, als die geometrische Linie oder Richtung, entlang welcher ein kleines Stück der Wellenfront fortschreitet.

stände von ausserordentlich kleinen Dimensionen gebracht werden, wie ein menschliches Haar, eine feine Nähnadel oder Wände mit scharfen Kanten u. s. w., kann bei Anwendung geeigneter Lichtquellen das Eindringen des Lichtes in den geometrischen Schatten beobachtet werden.

Unsere nächste Aufgabe ist es, zu zeigen, wie Wellen divergent und convergent gemacht werden können. Wenn wir einen Punkt als Quelle der Wellen benutzen, so zerstreuen sie sich oder divergiren ganz von selbst kreisförmig vom Lichtpunkte nach allen Richtungen und jeder Theil der Wellenfront hat eine gewölbte, nach aussen gekrümmte Form. Nehmen wir als Quelle eine ebene Oberfläche, sodass wir ebene Wellen erhalten,

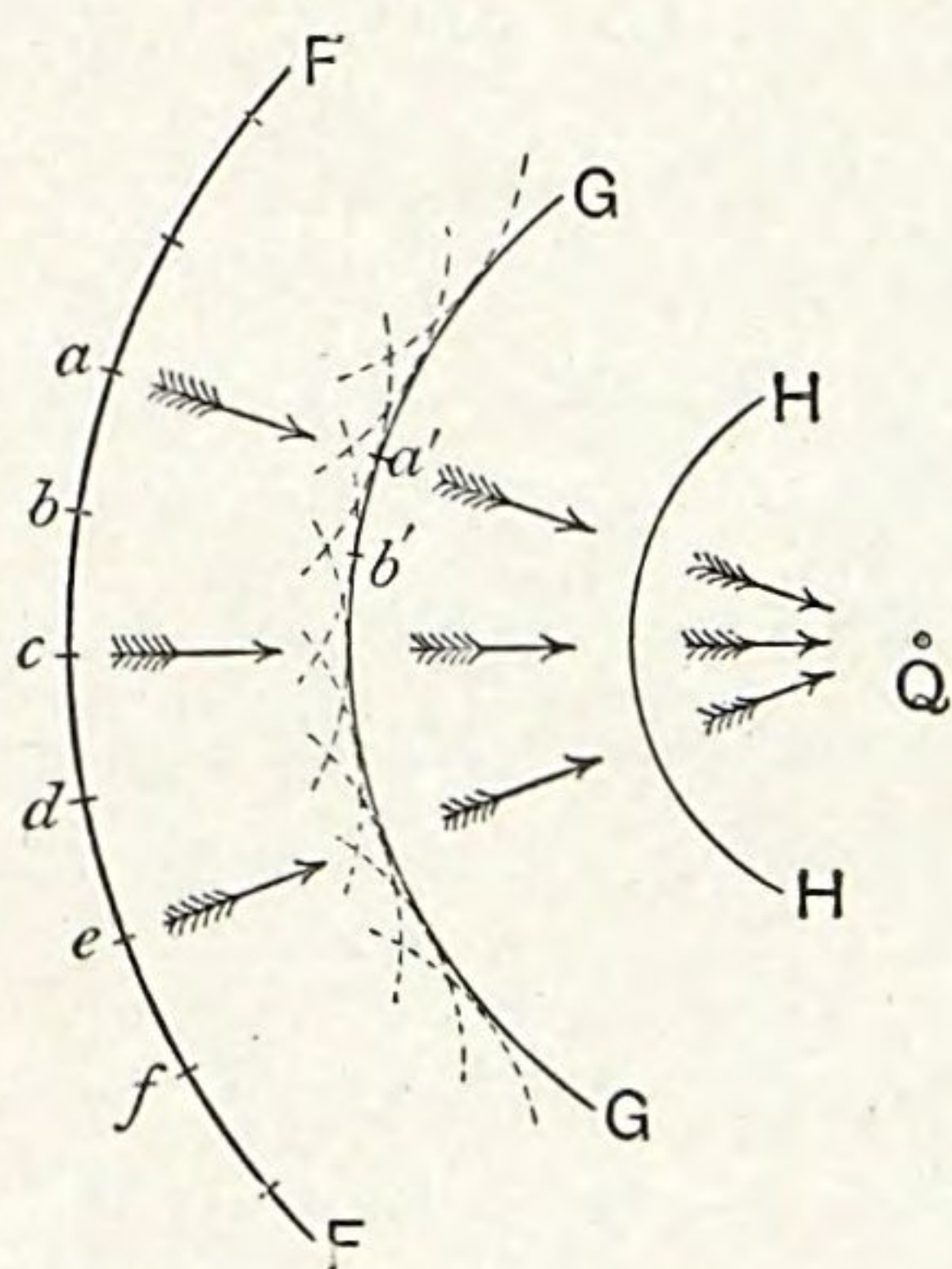


Fig. 5.

so schreiten diese auch weiter als ebene Wellen vorwärts, ohne sich zu zerstreuen (divergiren), noch sich zu vereinigen (convergiren). Wenn wir aber auf irgend eine Weise bewirken können, dass sich ein Wellenzug entwickelt, dessen Front eine hohle oder nach innen gewölbte Form besitzt, dann müssen die weiterschreitenden Wellen nothwendig convergiren und sich zu vereinigen suchen. Dies ist in Fig. 5 gezeigt. Darin stellt FF eine hohle Wellenfront vor, welche nach rechts hin weiter fortschreitet. Betrachten wir das kleine

Wellenstück bei a . Wenn es allein vorhanden wäre, würde es nach Verlauf einer kleinen Zeit bis a' gewandert sein; in ähnlicher Weise wäre b nach b' gegangen und so fort, so dass beim Zusammenwirken aller dieser einzelnen Wellen der Effect derselbe ist, als ob die Wellenfront FF bis nach GG gegangen wäre und dann beim Weiterwandern immer mehr zusammenschrumpfte. Nach dem Verlaufe eines zweiten gleich grossen Zeitintervalls wird die Welle sich bis auf die Wellenfläche HH zusammengezogen haben. Kurz, da die Wellen stets im rechten Winkel zu ihrer eigenen Front fortschreiten, so streben alle die Kugelwellen FF , GG u. s. w. zum Centrum Q .

Wir werden später sehen, auf welchem Wege man convergente, nach einem Punkte strebende Wellen erhält. Jetzt wollen wir die sich von selbst darbietenden divergirenden Wellen, wie sie von einem leuchtenden Punkte ausgehen, benutzen, um kennen zu lernen, wie man die Helligkeit zweier Lichtquellen miteinander vergleicht.

Hier ist eine kleine elektrische Glühlampe. Der Kaufmann, von dem ich sie kaufte, behauptet, dass die Lampe bei der vorgeschriebenen Spannung¹⁾ ebenso viel Licht geben würde, wie 16 Kerzen. Ich schliesse den Strom und die Lampe leuchtet. Ich zünde eine Standardkerze²⁾ an, damit Sie selbst die Helligkeit beider Lichter vergleichen können. Glauben Sie entscheiden zu können, dass die Glühlampe wirklich 16 Mal heller ist, als die Kerze? Nein, denn das Auge ist ein schlechter Beurtheiler der relativen Helligkeit. Wir müssen daher dem Auge seine Aufgabe, Helligkeiten zu vergleichen, erleichtern. Die zu diesem Zwecke construirten Hilfsapparate werden Photometer genannt.

Ehe wir die Wirkungsweise der Photometer verstehen können, müssen wir erst die Gesetze kennen lernen, nach denen die durch eine Lichtquelle auf einem weissen Schirm hervorgebrachte Beleuchtung mit der Entfernung sich ändert. Ich nehme jetzt ein weisses Papierblatt von einem Decimeter im Quadrat. Wenn ich dasselbe in die Nähe der Kerze bringe, so fängt es sehr viel Licht auf und wird sehr stark beleuchtet. Die Helligkeit des beleuchteten Papierblattes nimmt ab, je weiter ich dasselbe von der Kerze entferne. Durch Aenderung der Entfernung können wir also auch die Stärke der Beleuchtung des Papiers verändern.

Das Gesetz, nach welchem sich die Helligkeit der beschienenen Fläche mit der Entfernung ändert, geht aus der Art und Weise hervor, in welcher sich das von einem Punkte ausgehende Licht ausbreitet. Stellen wir uns zunächst die ganze Lichtmenge vor, welche von einem Lichtpunkt nach allen Richtungen hin ausgesandt wird. Von dieser ganzen Lichtmenge wird mein Papierblatt nur einen geringen Theil auffangen, wenn ich es in die Entfernung von

1) Der elektrische Druck oder die elektrische Spannung wird in einem Maasse gemessen, dessen Einheit man „Volt“ nennt; der gewöhnliche elektrische Druck einer Lampe, welcher von den elektrischen Werken der A. E. G. in Berlin in die Häuser geleitet wird, beträgt 110 Volt.

2) Die Standardkerze, wie sie durch die Gesetze des Board of Trade als die gesetzmässige Lichteinheit in England vorgeschrieben ist, verbraucht 120 Gran (grains) Spermaceti pro Stunde.

Anmerkung des Uebersetzers: In Deutschland ist die Kerze schon seit Jahren ersetzt durch die Hefnerlampe, ein kleines mit Amylacetat gespeistes Lämpchen, von genau vorgeschriebenen Dimensionen. Das bei einer Flammhöhe von 40 Millimeter ausgesandte Licht wird als „Hefnerkerze“ bezeichnet. Diese von Hefner-Alteneck construirte und von der Physik.-Techn. Reichsanstalt genau untersuchte Lampe wird von letzterer auch geprüft und beglaubigt.

einem Meter halte. Wir wollen jetzt diesen auffallenden Theil bei seinem weiteren Fortgang verfolgen. Fig. 6 zeigt, dass das Lichtbündel, welches in der Entfernung von einem Meter gerade ein Quadratdecimeter bedeckt, in der doppelten Entfernung, zwei Meter, eine viermal so grosse Fläche beleuchtet, und in der Entfernung von drei Metern eine neunmal so grosse Fläche. Es ist dies eine Folge der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes, von der wir weiter oben gesprochen haben. Wenn sich aber dieselbe Lichtmenge, die anfangs auf ein Quadratdecimeter fiel, später auf vier Quadratdecimeter vertheilt, so folgt nothwendig, dass jedes dieser vier Quadratdecimeter im Vergleich zu vorher nur den vierten Theil der Lichtmenge erhält und demnach ein Viertel so hell erscheint.

Wenn Sie ein Stück Butter auf ein Stück Brot streichen sollen, und man sagt Ihnen, Sie möchten dasselbe Stück Butter auf ein Brot von vierfacher Grösse streichen, so wissen Sie alle, dass dann der Butterbelag nur noch ein Viertel so dick ist wie vorher!

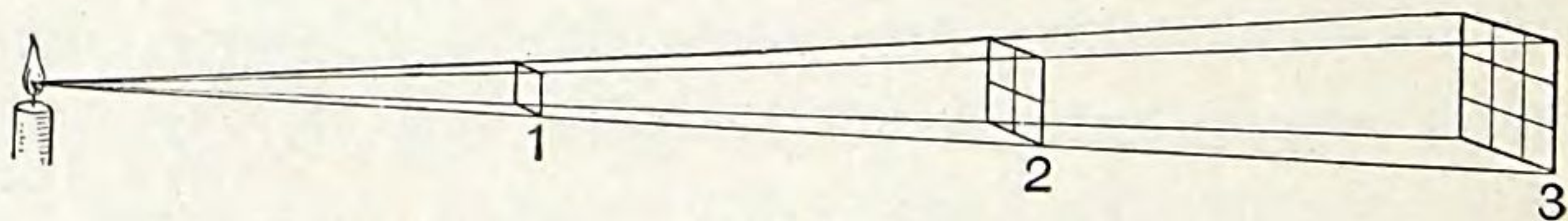


Fig. 6.

Und so ist es mit dem Licht. Lasse ich das Licht sich weiter ausbreiten, so wird es in der Zeit, in welcher es dreimal so weit gekommen ist, eine neunmal so grosse Fläche bedecken und die Stärke der Beleuchtung auf jedem der neun Quadratdecimeter in der dreifachen Entfernung wird nur noch ein Neuntel von derjenigen in der Entfernung von einem Meter betragen. Diese gewöhnlich als „Entfernungsgesetz“ bezeichnete Regel, gemäss welcher sich die Beleuchtung umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung ändert, ist die geometrische Folge des Umstandes, dass das Licht sich von einem Punkt aus auf immer grösser werdenden Kugelschalen ausbreitet, deren gemeinsamer Mittelpunkt der leuchtende Punkt ist.¹⁾

1) Die Thatsache, dass die Kerze und die meisten anderen Lichtquellen nicht punktförmig sind, verursacht bei den photometrischen Messungen einen Fehler, der in jedem Falle besonders zu bestimmen ist. Es kann dies nicht oft genug wiederholt werden, dass das Entfernungsgesetz nur Wirkungen zukommt die stricte von einem Punkte ausgegangen sind. Es gilt diese Mahnung auch bei der Benutzung des genannten Gesetzes im Magnetismus und in der Elektrizität.

Jetzt können wir uns mit der Vergleichung der relativen Helligkeit zweier Lichtquellen beschäftigen. Wir lassen die beiden Lichter auf ein Stück Papier, oder noch besser, auf zwei nebeneinander liegende Blätter scheinen und ändern die Entfernung der einen Lichtquelle, bis beide Blätter gleichmässig beleuchtet werden, also gleich hell erscheinen. Aus der Entfernung beider Lichtquellen können wir alsdann mit Hülfe des quadratischen Entfernungsgesetzes berechnen, wie hell die eine Lichtquelle im Vergleich zur andern ist. Das Auge, welches sehr schlecht schätzen kann, wie viel mal heller eine Lichtquelle ist als eine andere, vermag relativ leicht anzugeben, wann zwei beleuchtete, nebeneinander liegende Flächen gleich hell sind. Durch fortgesetzte Uebung kann diese Fähigkeit noch gesteigert werden. Freilich müssen wir unsere Anordnung so treffen, dass jedes der zu vergleichenden Lichter nur je eines der zu vergleichenden Felder bescheint. Eine einfache Weise, dies zu

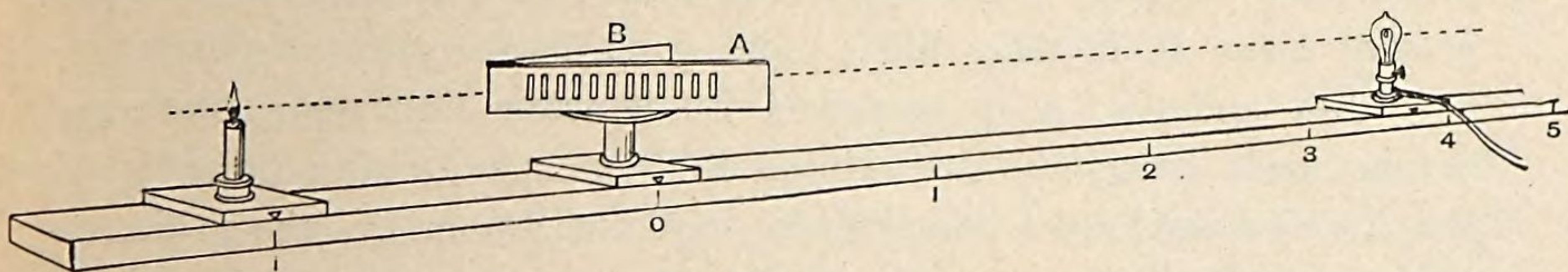


Fig. 7.

thun, ist die folgende: Man lässt jedes Licht von einem vertikalen Stäbchen einen Schatten auf einer weissen Wand werfen, so dass der vom ersten Licht erzeugte Schatten durch das zweite Licht und umgekehrt der vom zweiten Licht erzeugte Schatten durch das erste Licht beleuchtet wird und vergleicht nun die Helligkeit beider Schatten miteinander. Ändert man jetzt die Entfernung der Lichter so lange, bis die Schatten gleich dunkel erscheinen, dann ist die Beleuchtung jedes Schattens dieselbe und aus dem Verhältniss der Quadrate der Entfernungen ist wiederum das Verhältniss der Lichtstärke beider Lichtquellen zu berechnen.

Eine bessere Methode der photometrischen Vergleichung ist die folgende: Zwei Stücke weissen Papiers *A* und *B* (Fig. 7), zusammen ein *V* bildend, werden auf eine Photometerbank zwischen die zu vergleichenden Lichter gestellt. Das eine Licht scheint auf *A*, das andere auf die Oberfläche von *B*. In das Blatt *A* sind eine Anzahl Schlitze geschnitten, so dass man durch dieselben hindurch die Oberfläche von *B* erblicken kann. Man übersieht leicht den Verlauf der Erscheinung, wenn man *A B* zwischen den Lichtquellen verschiebt.

Ist die Beleuchtung von A stärker als die von B , so erscheinen die Schlitze dunkel auf hellem Grunde; ist aber B stärker beleuchtet als A , so erscheinen die Schlitze hell auf dunklem Grunde. Durch Bewegung der einen Lichtquelle nach $A B$ hin und von $A B$ fort kann die gegenseitige Helligkeit der beiden Felder geändert werden, bis Gleichgewicht, d. h. gleiche Helligkeit beider vorhanden ist; auch hier giebt das umgekehrte Verhältniss der Quadrate der Entfernungen direct das Verhältniss der beiden Lichtstärken.

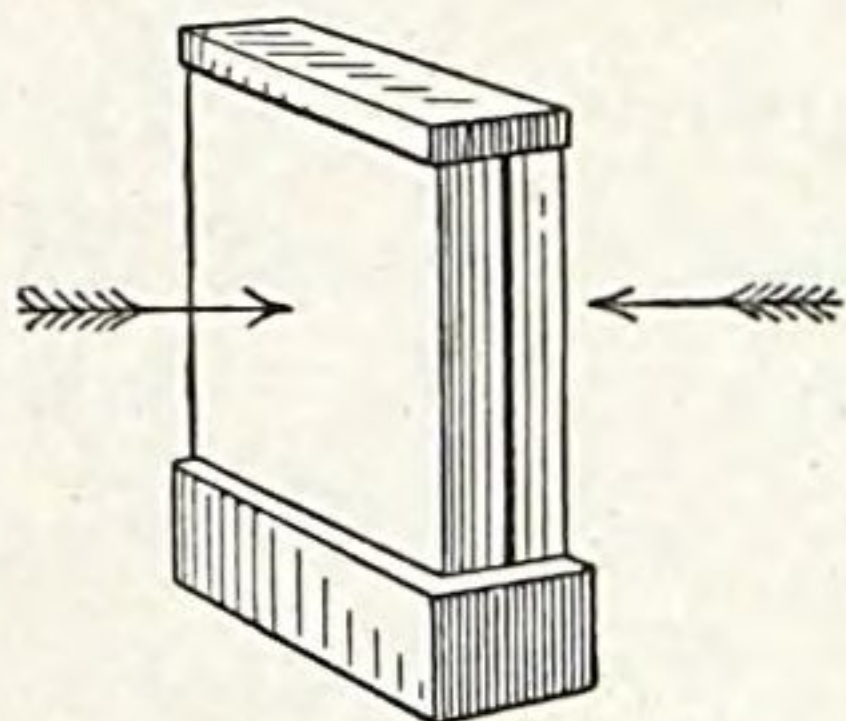


Fig. 8.

Mit diesem Photometer wollen wir jetzt unsere Glühlampe messen und sehen, ob deren Lichtstärke wirklich 16 Kerzen beträgt. Ich setze sie zu diesem Zwecke auf die Photometerbank und bewege sie hin und her, bis Gleichgewicht eintritt.

Sie sehen, dass dies der Fall ist, wenn die Entfernung der Lampe nicht ganz viermal so gross ist, wie diejenige der Kerze. Demnach beträgt deren Lichtstärke auch nicht ganz 16 Kerzen.

Ein anderes, sehr einfaches Photometer stellt man sich her, indem man zwischen zwei kleine Platten aus Paraffin (Fig. 8) ein Blatt schwarzes Papier oder Staniol legt und diesen in eine geeignete Fassung gebrachten Würfel auf die Photometerbank wie in Fig. 9

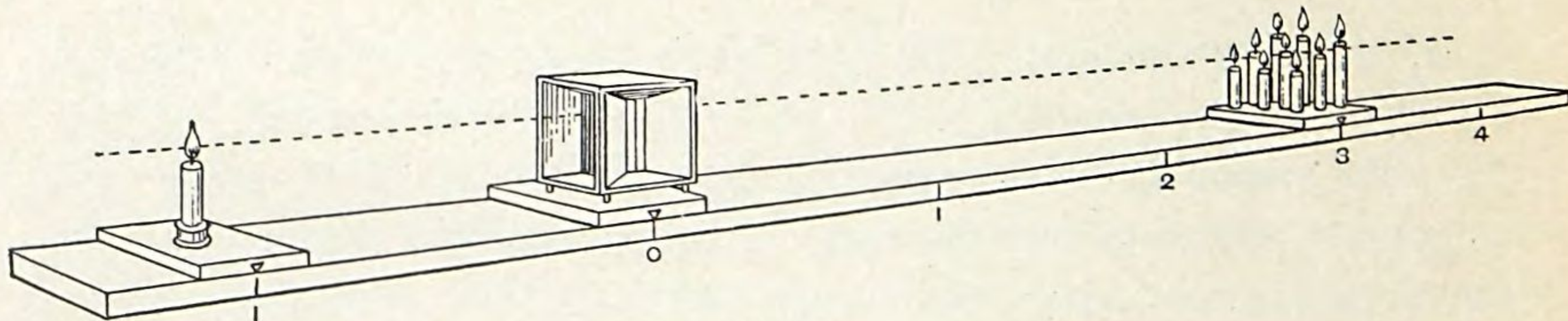


Fig. 9.

zwischen die Lichtquellen bringt, so aber, dass die Strahlen senkrecht zur Ebene des Staniols gerichtet sind, wie es die Figur zeigt. Falls beide Seitenflächen gleich stark beleuchtet werden, erscheinen die beiden Vorderflächen von gleicher Helligkeit. Ist die Beleuchtung eine ungleiche, so erscheint diejenige Platte heller, welche stärker beleuchtet wird. Mit diesem Photometer¹⁾ kann man die Helligkeit

1) Dieses Paraffinklotz-Photometer ist von Dr. Joly F.R.S. construiert worden. Es sind die beiden genannten Apparate dem Bunsen'schen Fettfleckphotometer vorzuziehen. Aber beide werden in Bezug auf Genauigkeit von dem Präcisionsphotometer von Lummer und Brodhun übertroffen, welches hier nur kurz beschrieben werden kann. Seine Messungen sind in der Form des „Contrast-

zweier Lichtquellen auch noch vergleichen, wenn deren Färbung von einander nicht allzuviel abweicht.

Wir kommen jetzt zur Reflexion des Lichtes mit Hülfe von Spiegeln. Eine Fläche polirten Metalls, wie z. B. Silber oder versilbertes Glas spiegelt die Lichtwellen sehr gut; in geringem Maasse spiegeln aber alle Substanzen die Lichtstrahlen, wenn man nur deren Oberfläche genügend glatt macht. Unter genügender „Glätte“ verstehe ich, dass die Erhöhungen oder Vertiefungen, kurz die Rauheiten auf der Oberfläche wesentlich kleiner sind, als die Wellenlänge des reflectirten Lichtes. Sind die Risse und Kratzer auf der Oberfläche ihrer Grösse nach kleiner als der vierte Theil einer Wellenlänge, d. h. also beim Licht kleiner als $\frac{1}{1000}$ mm, so verursachen sie keine „Auflösung“ der Wellen; solche Oberflächen sind für optische Zwecke „glatt“. Man erhält diese

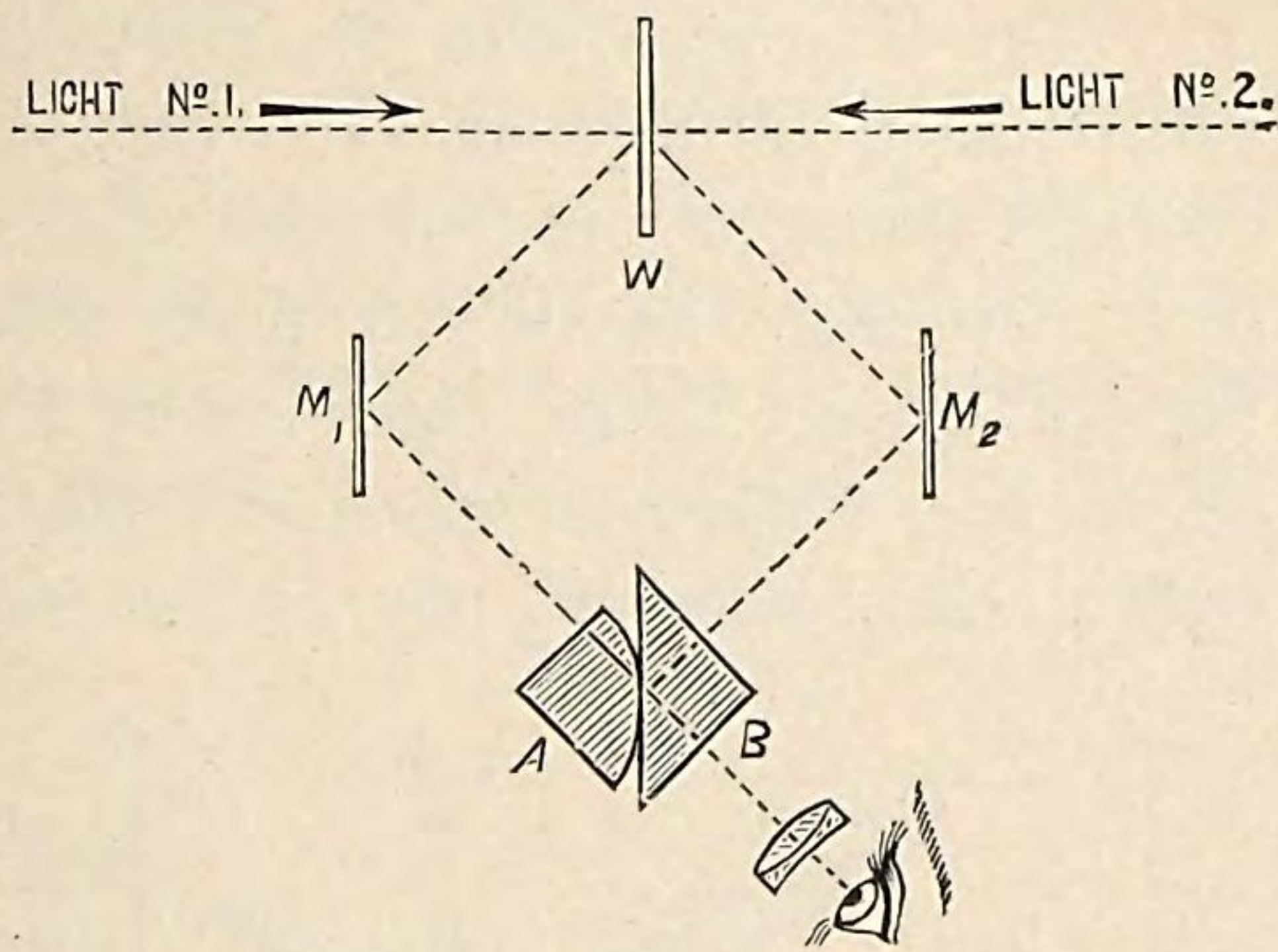


Fig. 10.

photometers“ bis auf unter $\frac{1}{4}\%$ genau. Die zu vergleichenden Lichter scheinen auf die beiden Seiten eines undurchsichtigen Gypsschirms W (Fig. 10). Das Auge erblickt diese beiden Schirmseiten gespiegelt von den beiden kleinen Spiegeln M_1 und M_2 und zwar mit Hülfe des Lummer-Brodhunschen Photometerwürfels AB , welcher, wie die Figur zeigt, aus zwei rechtwinkligen Prismen A und B besteht, deren Hypotenusenflächen sich längs eines kleinen Theiles so innig berühren (bezw. verkittet sind), dass alles auffallende Licht durch ihn ungehindert hindurch geht. Das von M_1 kommende Licht geht direct durch den gemeinsamen Theil der Hypotenusenfläche zum Auge, während die freien Theile der Hypotenusenfläche des Prismas B die von M_2 kommenden Strahlen zum Auge total reflectiren. Das Auge erblickt also den vom Licht Nr. 1 erleuchteten mittleren Fleck der Hypotenusenfläche des Würfels inmitten des vom Licht Nr. 2 erleuchteten übrigen Theils der Hypotenusenfläche und kann demnach sehr genau entscheiden, wann sie gleiche Helligkeit haben oder nicht.

Anmerkung des Übersetzers: Der in Fig. 10 abgebildete Photometerwürfel repräsentirt gleichsam den „idealen“ Bunsen'schen Fettfleck, da er an der durchsichtigen (beim Bunsenschirm gefetteten) Stelle alles Licht durchlässt und an der undurchsichtigen (beim Bunsenschirm nicht gefetteten) Stelle alles Licht reflectirt. Beim „Contrastphotometer“ stellt man nicht auf gleiche Helligkeit, sondern auf das gleichdeutliche Hervortreten zweier Felder ein.

Flächen durch das „Poliren“, indem man die ganze Oberfläche mit einem feinen Pulver behandelt und dasselbe so lange auf der ganzen Oberfläche umher führt, bis alle Kratzer kleiner als die Theilchen des Pulvers geworden sind, die natürlich bei Erzielung einer hochpolirten Fläche weit unter der Grösse der Lichtwellen bleiben müssen.

Der Rückprall oder die Reflexion der auf eine polirte Fläche auftreffenden Lichtwellen kann nun, gleichviel, ob die Fläche eben oder gekrümmt ist, mit Hülfe derselben Principien der Wellenbewegung studirt werden, welche wir oben schon kennen gelernt haben. In Fig. 11 kommt Licht vom Punkt P und breitet sich nach allen Seiten aus, sodass ein gewisses Strahlenbüschel auch den Spiegel SS treffen wird, wenn wir ihn in den Gang der Strahlen bringen. Von

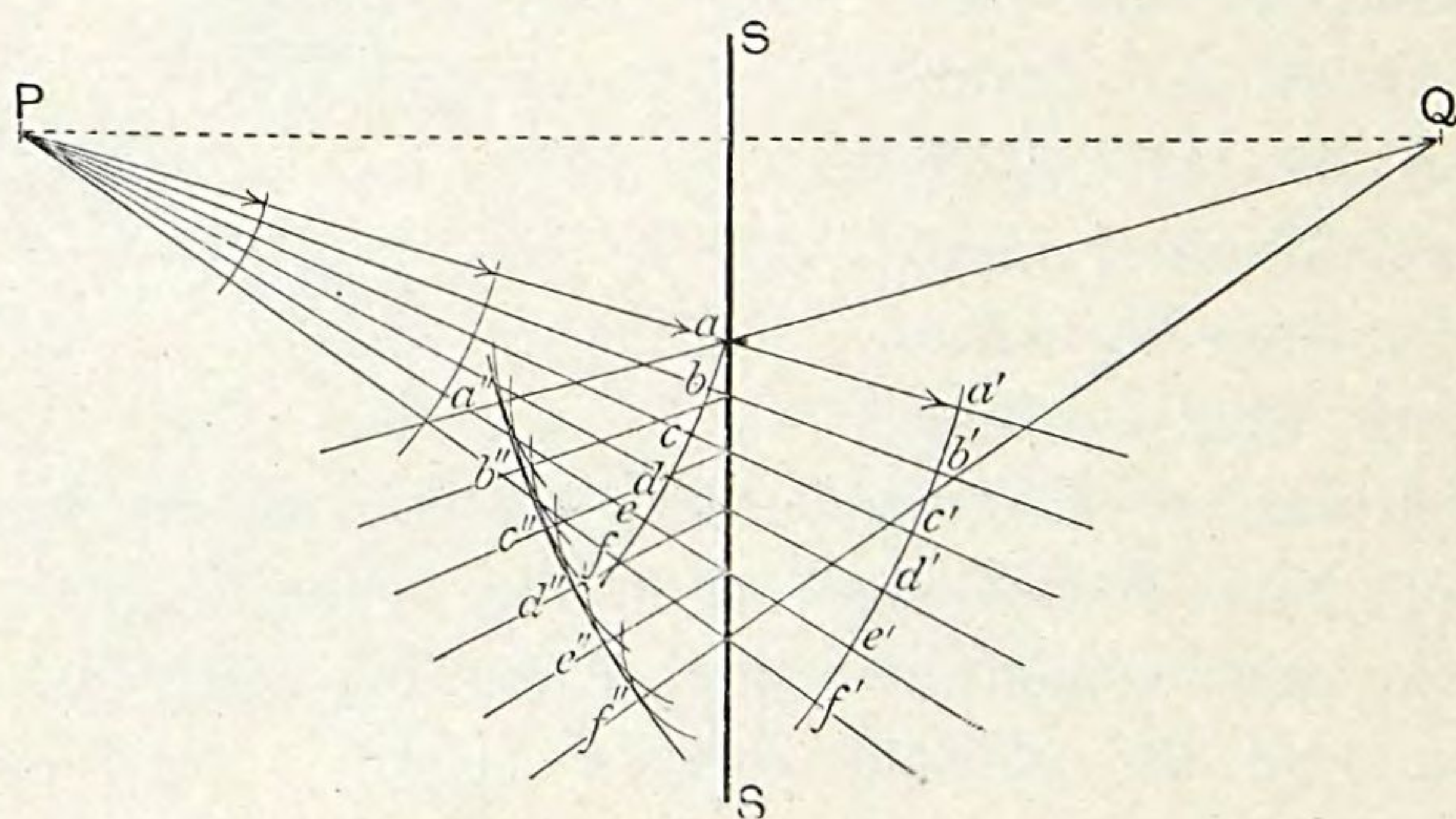


Fig. 11.

diesem Strahlenbüschel trifft aber die kreisförmige Wellenfront die Spiegelfläche nicht zu gleicher Zeit. Betrachten Sie denjenigen Theil der Welle, welcher den Spiegel bei a erreicht. Wenn er nicht durch den Spiegel aufgehalten würde, ginge er in einem kurzen Zeitmoment bis zum Punkt a' in gleicher Richtung weiter. Aber von der Spiegelfläche zurückgeworfen, giebt er Veranlassung zu einem Wellenzuge, welcher sich um die gleiche Strecke aa' nach rückwärts fortpflanzt. Darum ziehen Sie mit Ihrem Zirkel die kreisförmige Einzelwelle a'' , indem Sie als Mittelpunkt den Punkt a und als Radius die Strecke aa' benutzen. Das nächste Stück der Welle bei b erreicht den Spiegel ein wenig später. Die Länge von b nach b' ist daher etwas kleiner, als diejenige von a nach a' . Demnach nehmen Sie jetzt das kleinere Stück als Radius und schlagen den Kreis bb'' . Indem wir so fortfahren, erhalten wir lauter Kreisbögen c'' , d'' , e'' etc., somit auch die Wellenfront $a''f''$ der reflectirten Welle, welche sich, wie Sie sehen, vom Spiegel aus rückwärts so ausbreitet, als ob sie

vom Punkte Q auf der anderen Seite des Spiegels hergekommen wäre. In der That liegt der Punkt Q bei einem ebenen Spiegel genau eben so weit hinter der spiegelnden Oberfläche wie der leuchtende Punkt vor derselben gelegen ist. Man nennt Q das Spiegelbild oder kurz das „Bild“ des Punktes P .

Auf meinem Wellenteiche kann ich Ihnen zeigen, dass die Reflexion wirklich so vor sich geht, als ob die Wellen von einem Punkte hinter dem Spiegel herkämen. Ich tauche in denselben einen ebenen Metallstreifen, welcher als Spiegel dient, und Sie sehen, dass die darauf fallenden Wellen nach ihrer Reflexion mit umgekehrter Krümmung zurücklaufen, als ob sie in einem Punkt hinter dem Streifen erzeugt wären.

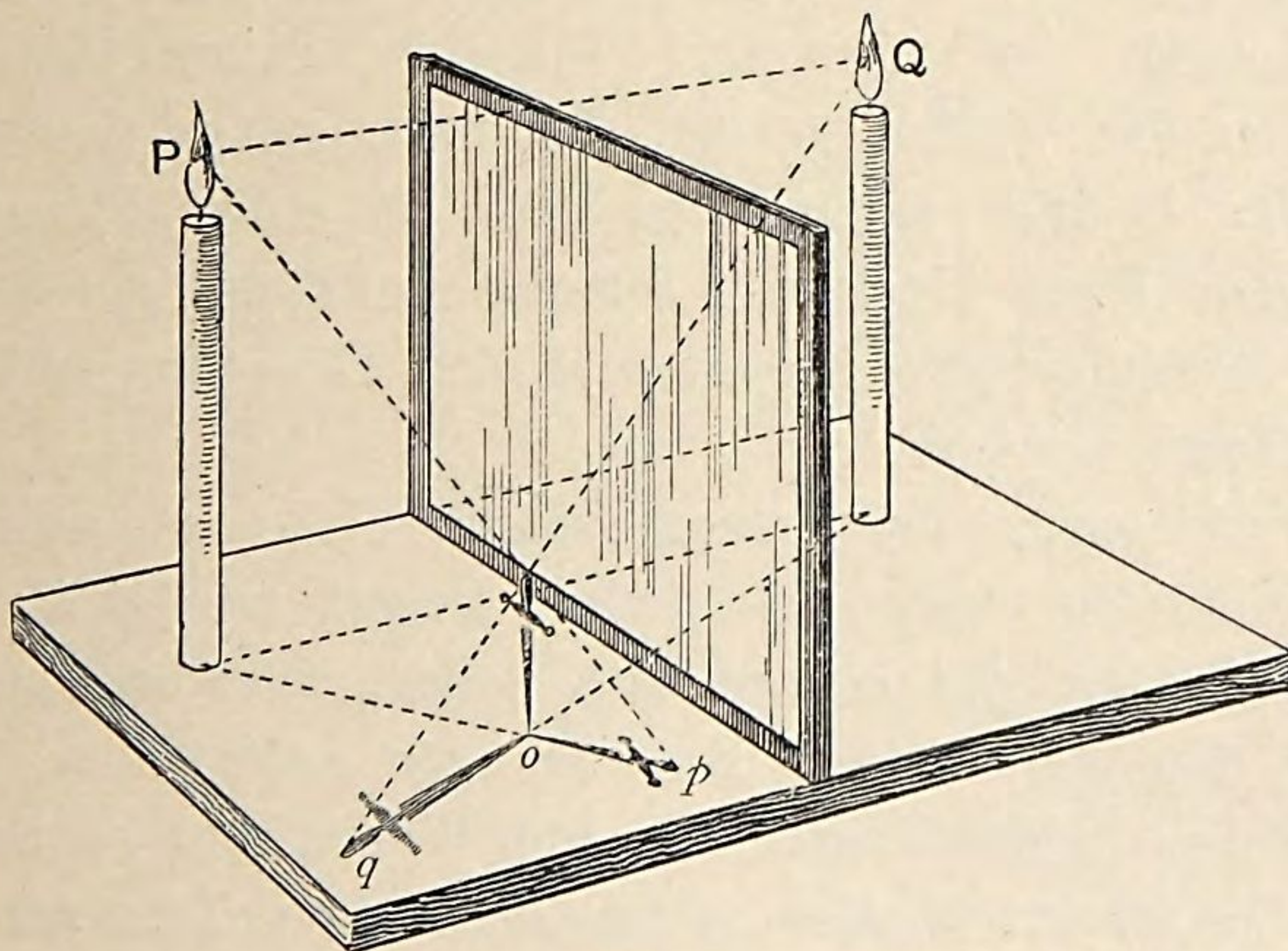


Fig. 12.

Denselben Vorgang kann ich Ihnen auch zeigen, indem ich eine Kerze und ein Spiegelglas benutze.

Um die Richtung kennen zu lernen, in welcher Licht ankommt, brauchen wir nur die Richtung des durch die ankommenden Lichtstrahlen erzeugten Schattens festzustellen. Steche ich (Fig. 12) diesen Dolch in das weisse Brett und stelle eine Kerze auf demselben bei P auf, so wirft dieselbe einen Schatten des Dolches, der von P längs op läuft. Jetzt halte ich ein Stück eines versilberten Glasspiegels ein wenig weiter ab, und sofort entstehen zwei Schatten. Der eine directe op war schon vorher vorhanden; der andere oq aber ist der Schatten, welchen die vom Spiegel reflectirten Wellen entworfen haben, und Sie sehen aus der Richtung oq dieses zweiten Schattens, dass er der gleiche ist, der entstünde, wenn kein Spiegel vorhanden wäre

und die Kerze sich bei Q am Orte des Spiegelbildes von P befände. Dabei steht PQ senkrecht zur Spiegelebene, und P und Q sind gleich weit von ihr entfernt. Zum Beweise dessen lassen Sie uns eine wirkliche, zweite Kerze bei Q aufstellen und den Spiegel fortnehmen; Sie sehen den von ihr entworfenen Schatten an demselben Ort und von gleicher Gestalt wie zuvor. Hierdurch haben wir auf experimentellem Wege die Richtigkeit unseres theoretisch abgeleiteten Resultates bewiesen.

In der That brauchen Sie nur in einen ebenen Spiegel zu blicken und die Bilder der von ihm gespiegelten Gegenstände zu betrachten, um sich selbst von der Gültigkeit unserer Regel zu überzeugen. Die Bilder der Gegenstände sind stets eben so weit hinter dem Spiegel gelegen, wie die Gegenstände vor demselben, wobei Rechts und Links vertauscht ist. Vielleicht haben Sie schon von jenem Fürsten der Wilden gehört, der nach seiner Gefangennahme am Bord des Schiffes zum ersten Mal in einen Spiegel blickte, welcher an der Wand hing, und sogleich um denselben herum nach hinten lief, damit er jenen anderen wilden Häuptling treffe, den er hinter der Wand vermuthete.

Wenn wir anstatt der ebenen Spiegel solche von gekrümmter Oberfläche benutzen, finden wir andere Regeln zur Construction der auftretenden Bilder. Es kommt dies daher, dass die gekrümmten Oberflächen den Wellen neue Krümmungen aufdrücken, indem sie dieselben zwingen, ihre Marschlinie oder Wellenfront zu ändern. Es giebt, wie Sie wissen werden, zwei Arten von Krümmungen. Ist die Oberfläche erhaben nach aussen, so nennen wir sie *convex*; ist die Oberfläche hohl, so heisst sie *concav*.

Ich lege jetzt in meinen Wellenteich einen gekrümmten Metallstreifen, dessen Wölbung nach der Stelle hin gelegen ist, an welcher ich die Wellen erzeuge. Nehmen Sie an, ich sende eine Anzahl von ebenen Wellen gegen die Oberfläche des Metallstreifens, dann muss nothwendig der Theil der Wellenfront, welcher die spiegelnde Oberfläche zuerst trifft, auch zuerst reflectirt werden. Die anderen Theile der ankommenden ebenen Wellen treffen später auf, und bleiben somit auch nach der Reflexion hinter jenen zurück, so dass die reflectirte Welle eine gekrümmte Wellenfront annehmen muss. Der gekrümmte Spiegel hat in Wirklichkeit den reflectirten Wellen eine Krümmung aufgedrückt, welche zweimal so gross ist, wie seine eigene. Sie können dies aus Fig. 13 erkennen, wo ebene Wellen gegen den gekrümmten Spiegel bei M marschiren.

Der Mittelpunkt M der krummen spiegelnden Oberfläche wird zuerst von den ankommenden Wellen getroffen, und wirft diesen Theil der ebenen Welle zurück. Wäre kein Hinderniss dagewesen, so würde die Welle nach einem kleinen Zeitintervall bis nach A gekommen sein. Aber wo geht sie in Wirklichkeit hin? Das Stück, welches M trifft, geht zurück und zwar um die Strecke $MB = MA$, also bis nach B . Das Wellenstück bei a kommt etwas später an und wird dann zurückgeworfen. Nehmen Sie wieder Ihren Zirkel und messen Sie die Distanz, welche das Wellenstück ohne Vorhandensein des Spiegels bis a' zu gehen hätte; dann wenden Sie Ihren Cirkel und schlagen einen Kreisbogen mit demselben Radius aa' bis a'' . Dasselbe machen Sie für die Wellenstücke bei b und c , und Sie werden finden, dass die neue Wellenfront, welche aus den einzelnen

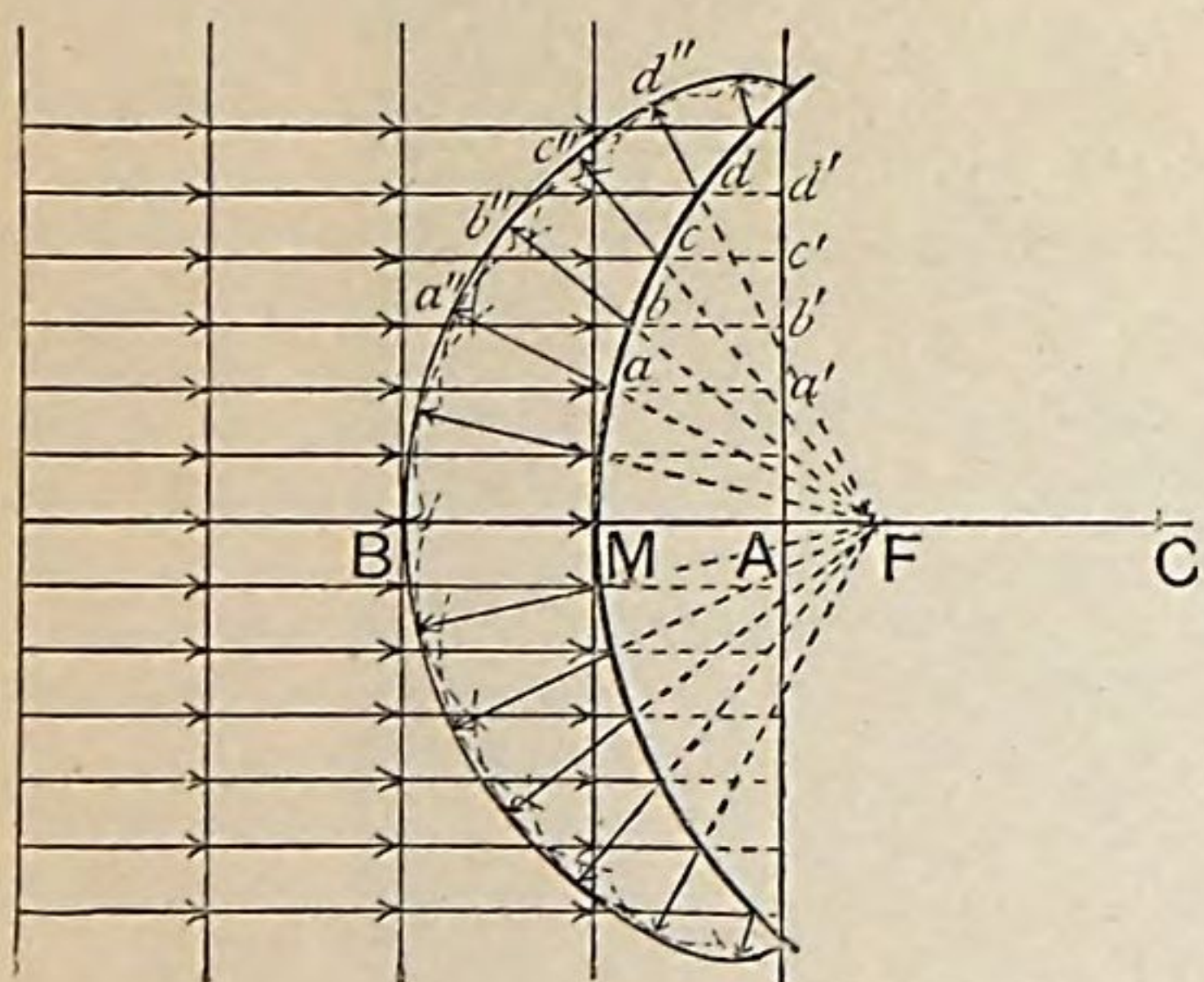


Fig. 13.

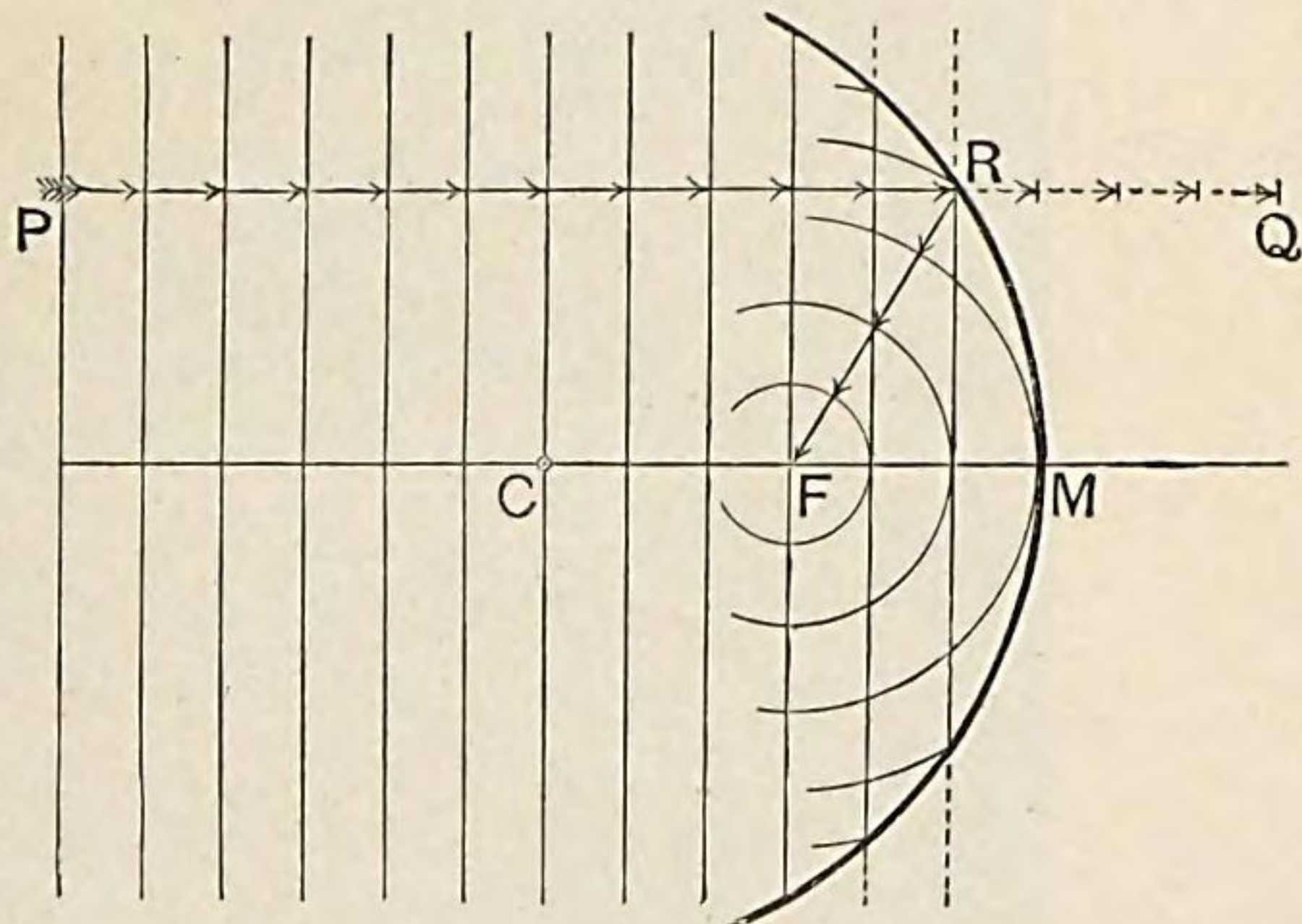


Fig. 14.

resultirt, so rückwärts schreitet, als ob sie vom Punkte F ausgegangen wäre. Dieser Punkt liegt auf der halben Strecke zwischen M und dem Krümmungszentrum C der spiegelnden Oberfläche.

Benutze ich statt eines convexen Spiegels einen Hohlspiegel mit einer concaven Oberfläche (Fig. 14), so drückt diese einer reflectirten Welle eine concave Form auf, deren Krümmung zweimal so gross ist, wie diejenige der spiegelnden Fläche. Hierbei lernen wir eine neue Wirkung kennen. Sie sehen in meinem Wellenteiche, dass, wenn die ebenen Wellen die concave Fläche treffen, der mittlere Theil erst reflectirt wird, nachdem alle anderen Theile schon zurückgeworfen und auf ihrem Rückzuge begriffen sind, und dass die reflectirte Welle eine dem Spiegel ähnliche hohle Krümmung besitzt. Jedenfalls zeigt der Versuch, dass die reflectirten Wellen mit der concaven Wellenfront convergiren, und, rückwärts marschirend, sich in dem Punkte F sammeln. Das Wellenstück bei P geht geradlinig, bis es den Spiegel bei R trifft. Von hier wird es, statt

nach Q weiter zu gehen, nach innen reflectirt, und gelangt nach F , wohin auch die anderen Theile der Welle zielen. In diesem Punkte findet also ein wirkliches Zusammentreffen aller reflectirten Wellen statt; es entsteht daselbst ein reeller Brennpunkt oder Focus, abweichend vom vorigen Falle, wo der Brennpunkt F (Fig. 13) virtuell war, d. h. ein solcher, von dem die reflectirten Wellen herzukommen schienen. Wir haben demnach gelernt, dass ein Concav- oder Hohlspiegel wenigstens für Wasserwellen eine wirkliche Vereinigung der Wellen in einem Punkte hervorbringt.

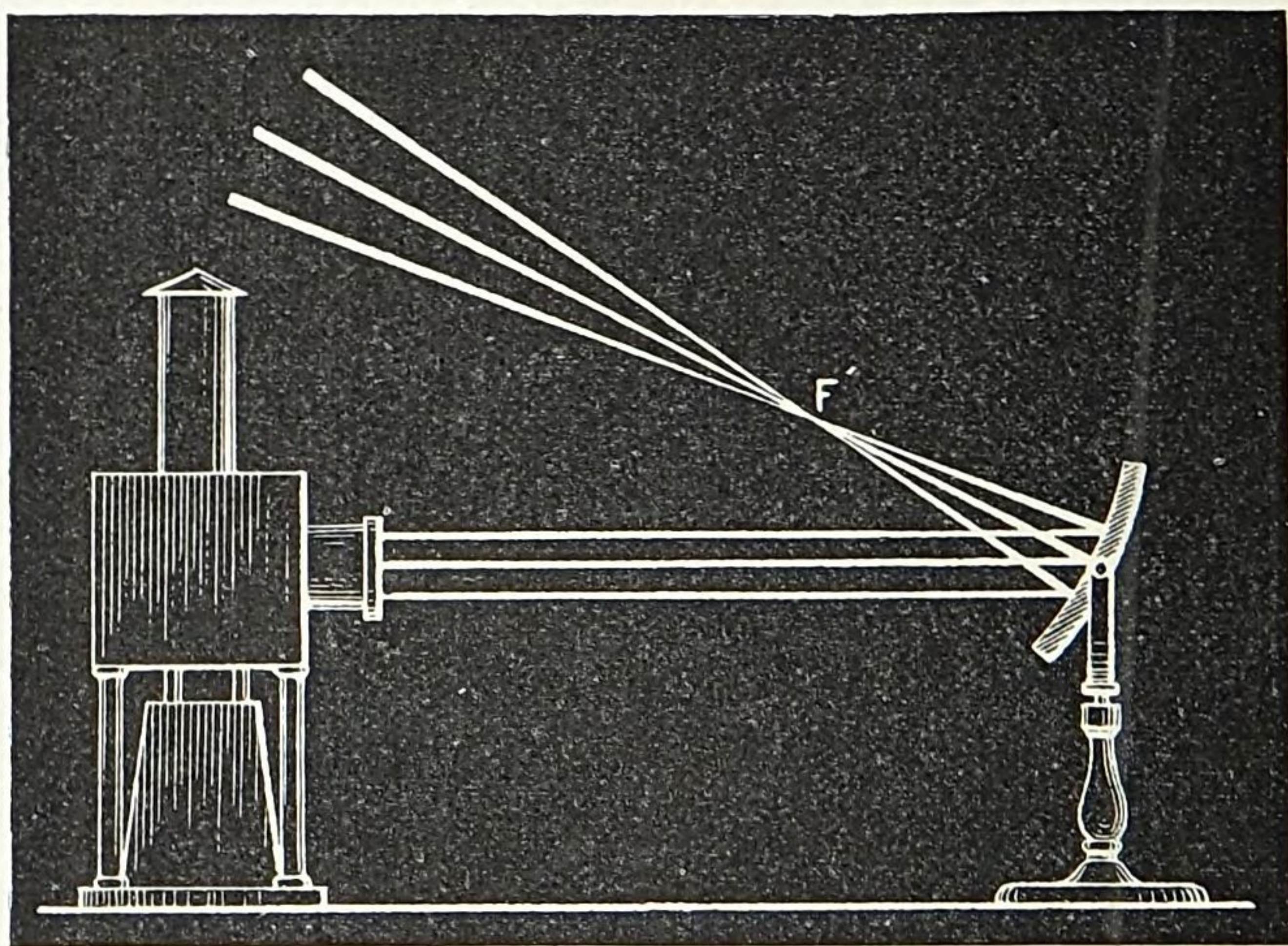


Fig. 15.

Wir wollen uns davon überzeugen, dass dasselbe auch mit Lichtwellen möglich ist, wenn wir versilberte Hohlspiegel benutzen. Mein Assistent lässt aus der optischen Laterne, in der sich eine Bogenlampe befindet, ein breites cylindrisches Büschel von Lichtstrahlen austreten. Die Luft ist staubig, jedes Staubtheilchen fängt einen Theil des Büschels auf und zeigt uns somit den Weg, welchen der Lichtstrahl nimmt. Ich halte jetzt in das Büschel einen versilberten Hohlspiegel. Sogleich sehen Sie, wie der Spiegel den Wellen eine gekrümmte Front aufdrückt und dieselben dadurch zwingt, sich in einem Punkt hier mitten in der Luft (F' in Fig. 15) zu vereinigen. Dieser Punkt ist der Brennpunkt des Spiegels. Sie werden ferner bemerken, dass ich durch Drehen des Spiegels die Lage des Brennpunktes wechseln und das Strahlenbüschel je nach Belieben an verschiedenen Orten des Raumes vereinigen kann.

Ersetze ich den Hohlspiegel durch einen Convexspiegel, so bringe ich die Strahlen zur Divergenz. Dann besteht kein realer Brennpunkt mehr, den ich auf einem Schirme auffangen könnte, sondern die Wellen gehen vom Spiegel fort, als ob sie von einem virtuellen Brennpunkt hinter dem Spiegel kämen (F' Fig. 16), genau ebenso, wie wir es bei den Wasserwellen beobachtet haben.

Wir haben also kennen gelernt, dass man wirkliche und reelle Bilder dadurch erhalten kann, dass man einer Wellenstirn und allen folgenden Wellenlinien eine concave Gestalt giebt, damit sie nach einem Punkte convergiren. Wir wollen jetzt noch einige weitere Experimente über die Entstehung von Bildern anstellen. Wir ent-

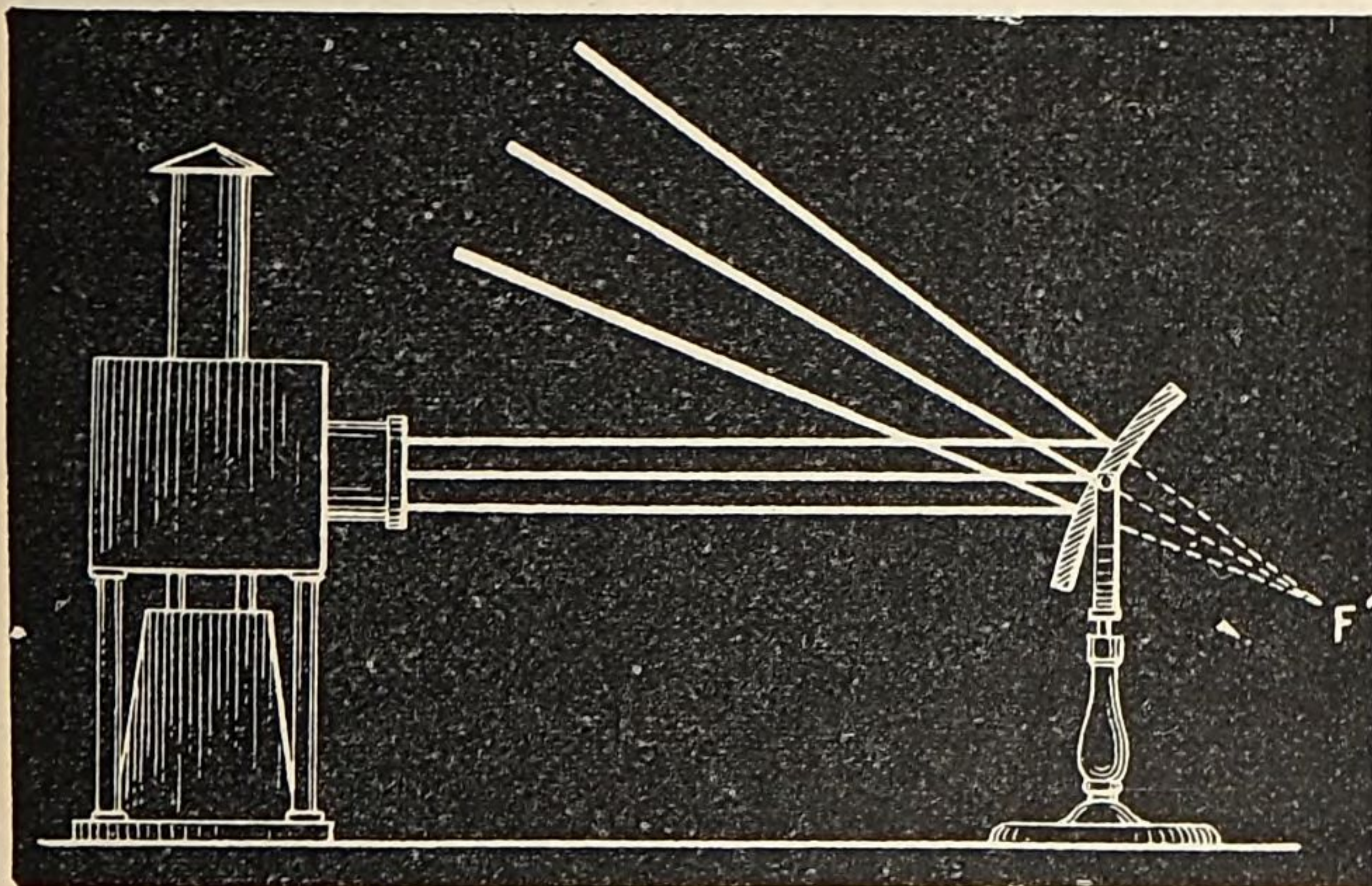


Fig. 16.

fernen von der optischen Laterne alle Linsen und lassen im Innern derselben lediglich die elektrische Bogenlampe. Sie wissen, dass in einer solchen Lampe sich zwei Kohlenstifte befinden; zwischen den einander beinahe berührenden Spitzen überwindet der elektrische Strom den Widerstand der Luft, wobei er einen Lichtbogen bildet und die Kohlen zur hohen Weissgluth erhitzt.

Ich bedecke die Oeffnung vor der Laterne mit einem Metallblech, in welches ich ein feines Loch gebohrt habe. Sofort sehen Sie auf dem Schirm ein Bild der beiden weissglühenden Spitzen der Kohlenstäbe entworfen (Fig. 17 a. f. S.). Die positive Kohle hat ein flaches Ende, die negative Kohle ist ausgehöhlt. Wie Sie sehen, ist das Bild ein umgekehrtes; seine Entstehung auf dem Schirm ist eine blosse Folge der geradlinigen Fortpflanzung des Lichtes. Bohre ich in den Verschluss der Lampe noch ein zweites Loch, so erhalten

wir noch ein zweites Bild. Diesmal habe ich kein rundes, sondern ein viereckiges Loch gebohrt. Trotzdem ist das zweite Bild genau so wie das erste. Es hängt das Lichtbild eben nicht ab von der Form der Oeffnung. Ich bohre nun eine neue dreieckige Oeffnung und wir erhalten wieder ein neues Bild von gleicher Gestalt. Bohre ich eine ganze Anzahl von Löchern, so erhalte ich die gleiche Anzahl von Bildern, die alle in ähnlicher Weise angeordnet sind wie die Löcher selbst.

Will ich jetzt statt so vieler einzelner Bilder ein einziges Abbild hervorbringen, so muss ich irgend wie bewirken, dass alle diese verschiedenen Strahlenbüschel nach derselben Stelle des Schirmes laufen. In anderen Worten, die Entstehung sehr lichtstarker Bilder kann man nur dadurch erzielen, dass man von den

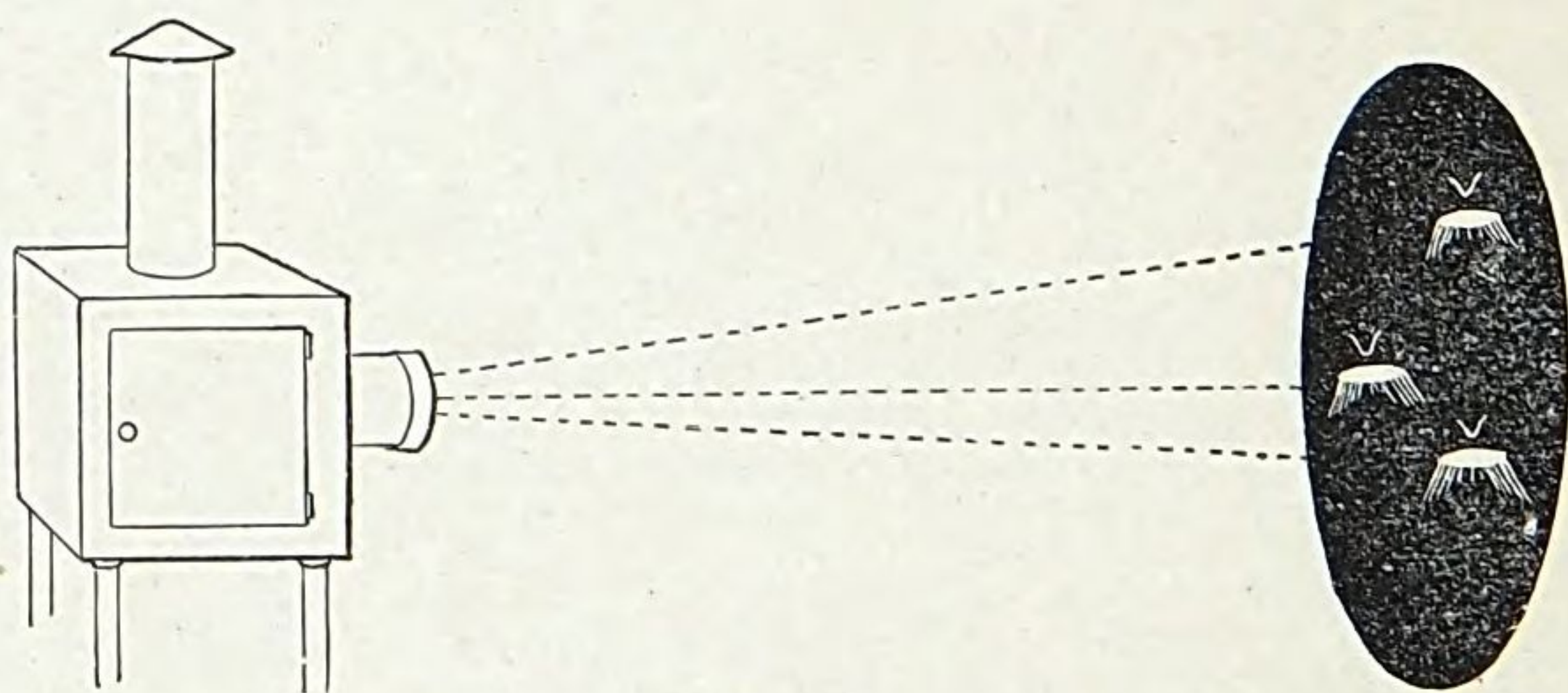


Fig. 17.

besprochenen Mitteln und Wegen Gebrauch macht und einer Welle eine convergente Wellenstirn aufdrückt. Sie wissen, dass z. B. ein Hohlspiegel dies thut. Gut, lassen Sie mich einen solchen gebrauchen und ihn in richtiger Weise in den Gang der Strahlen stellen. Sie sehen, wie mit einem Male alle Lichtbilder verschwinden und nur ein einziges von grosser Helligkeit entsteht. Entfernen wir jetzt den Metalldeckel mit den verschiedenen Oeffnungen, so dass wir mit dem ganzen Strahlenbüschel arbeiten, so erhalten wir ein noch helleres Bild der Kohlenspitzen.

Indem ich die Bogenlampe durch eine Gruppe kleiner gefärbter Glühlampen ersetze, bewirke ich, dass deren Lichtbüschel durch meinen Hohlspiegel reflectirt werden; wie Sie sehen, kann ich mittels eines dünnen, durchscheinenden Handschirmes den Ort aufsuchen, wo die Bilder der Glühlampen entstehen. Jedes Spiegelbild ist umgekehrt und, da es in einer Entfernung vom Spiegel entsteht, welche grösser ist als diejenige des Objectes zum Spiegel, so ist es vergrössert. Entfernen wir das Object mehr und mehr vom Spiegel,

so rückt das Bild näher und näher, wird dabei kleiner und kleiner, behält aber seine umgekehrte Lage bei.

Bisher haben wir uns nur mit der regelmässigen Reflexion beschäftigt, so weit sie an fein polirten Oberflächen stattfindet.

Sind die Oberflächen nicht genügend polirt, d. h. sind die Kratzerfurchen und oberflächlichen Rauigkeiten nicht wesentlich kleiner als die Wellenlänge, dann bleibt zwar die Reflexion immer noch bestehen, dieselbe ist aber unregelmässig. Weisses Papier spiegelt in dieser Weise. Hier erhalten Sie kein ausgeprägtes Bild, weil die feinen Unebenheiten in der Structur die Wellenfläche zerstören und die Strahlen nach allen Richtungen zerstreuen. Dies ist der Grund, warum weisses Papier weiss aussieht, von welcher Seite Sie dasselbe auch ansehen mögen. Hat die reflectirende Substanz, wie z. B. Seide eine gewisse Faser oder Korn, welches in einer Richtung ein wenig besser spiegelt als in der anderen, dann hängt die gespiegelte Lichtmenge von der Richtung ab, in welcher das Gespinnst das Licht empfängt, und andererseits von dem Winkel, unter welchem die Lichtstrahlen zur Oberfläche geneigt sind. Es ist dies leicht an dem metallischen Abdruck zu demonstrieren, welchen man auf galvanischem Wege von einem Stück Seide genommen hat. Hier ist ein solches Stück. Es wurde in einer Form aus Guttapercha ¹⁾ auf einem Stück Seidenstoff (Brocat) niedergeschlagen. Es hat ganz das Aussehen von Seide, weil es das Gefüge der Seide insofern besitzt, als es partielle Reflexion hervorbringt. Wenn Seide in der „Kette“ in einer anderen Farbe als im „Schuss“ gewebt wird, so werden die verschiedenen Farben trotz gleichen Winkels verschieden stark reflectirt, und so entsteht der durch die „shot“-Seide erzeugte Effect.

Um Ihnen die Eigenthümlichkeit der diffusen Reflexion zu illustriren, will ich Ihnen zwei Experimente zeigen. Hier ist ein Stück Spiegelglas. Ich male auf dasselbe mit chinesischem Weiss das

1) Dasselbe ist durch Herrn E. Rousseau, dem Lehrer für Elektrochemie am technischen College, Finsbury, angefertigt. Sein Verfahren, in einer geschmolzenen Guttaperchamischung die Matrizen zu giessen, welche nachher metallisch überzogen werden, um im metallischen Bade den Niederschlag anzunehmen, ist weitaus dem gewöhnlichen Verfahren überlegen, bei welchem die Formen mittels der hydraulischen Presse gewonnen werden. Bei Gelegenheit stellte er für mich einen Abdruck eines Rowlandschen Beugungs-Gitters her, welches 14 400 parallele Linien auf einer Strecke von etwa 25 mm Länge besass. Gleich dem Originale zeigte der Abdruck glänzende Beugungsfarben.

Wort „Licht“. Die Buchstaben erscheinen hell auf dunklem Grunde. Lasse ich aber an der Schrift einen Strahl der elektrischen Lampe reflectiren und zwar auf jene Wand dort, so erscheinen die Buchstaben schwarz. Das auf die Schriftzüge fallende Licht wird nach allen Richtungen zerstreut (darum erscheinen sie Ihnen beim directen Anblick weiss); während also die von der Lampe kommenden Wellen von den übrigen spiegelnden Theilen des Spiegelglases in einer Richtung (nämlich zur Wand) gespiegelt werden, gelangen von der Schrift dorthin nur einige wenige Strahlen, und sie erscheint daher dunkel auf hellem Grunde.

Sodann will ich Ihnen zeigen, wie viel Licht in Wirklichkeit von einem Stück Papier reflectirt wird. Dazu brauche ich nur

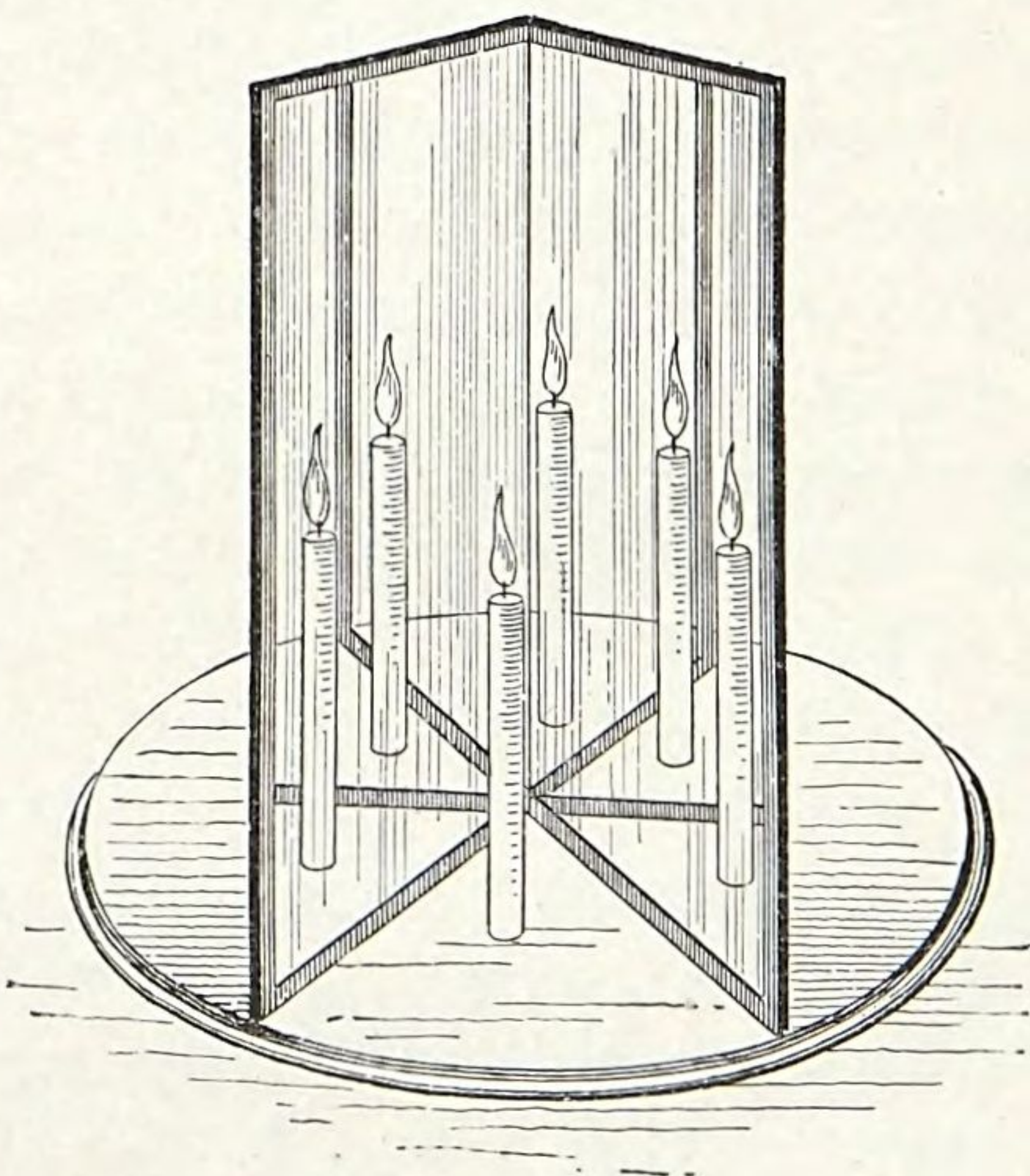


Fig. 18.

meine Lampe auf dieses weisse Papierblatt scheinen zu lassen und dasselbe nahe an die Wange jener weissen Marmorfigur zu halten, um Sie erkennen zu lassen, welche Lichtfülle dasselbe in der That auf den Gegenstand wirft. Tausche ich das weisse Papier gegen rothes ein, d. h. gegen ein Papier, welches die rothen Wellen besser reflectirt als die übrigen Farben, so wird hauptsächlich das rothe Licht auf die Figur gespiegelt und zaubert daselbst auf der Wange künstliches Blut hervor.

Fällt Licht von einem Spiegel auf einen zweiten, welcher mit dem ersten einen Winkel bildet, so werden zwei oder mehr Bilder erzeugt, je nach dem Winkel zwischen den Spiegeln. Hier habe ich zwei ebene Spiegel (Fig. 18) mit einander befestigt, wie die Blätter eines Buches. Oeffne ich dieselben, bis sie einen Winkel von 120 Grad mit einander bilden und setze eine Kerze zwischen dieselben, so erzeugt jeder Spiegel ein besonderes Bild und Sie sehen, zwischen die Spiegel blickend, im Ganzen drei Kerzen. Klappe ich die Spiegel ein wenig mehr zusammen, sodass sie einen Quadranten eines Kreises einschliessen, d. h. einen Winkel von 90 Grad mit einander bilden oder zu einander senkrecht stehen,

so erscheinen vier Kerzen, eine wirkliche und drei Bilder. Schliesse ich den Winkel bis auf 72 Grad oder bis auf $\frac{1}{5}$ eines Kreises, so sehen Sie fünf Kerzen. Bei einem Winkel von 60 Grad erscheinen sechs Kerzen. Auf diesem Princip des „Winkelspiegels“ beruht das sogenannte „Kaleidoskop“, mit welchem infolge Vervielfachung der Bilder sich viele sehr schöne und merkwürdige Combinationen von Mustern und Farbenzusammenstellungen erzielen lassen. Selbst mit zwei solchen Spiegeln, wie die, welche ich hier habe, sind einige reizende Wirkungen möglich. Wenn beide fast ganz zusammengelegt sind, so erscheint ein einzelnes Licht auseinander gezogen zu einem Ring von lauter Spiegelbildern. Oeffnen Sie dieselben bis auf 72 Grad oder einen Winkel von 90 Grad und probiren Sie die Wirkung, welche eintritt, wenn Sie Ihre beiden Hände plötzlich zwischen die Spiegel bringen. Je nach dem gewählten Winkel erscheinen wie durch Zauberei gleichzeitig zehn oder acht Hände. Bringen Sie zwischen die Spiegel ein Stück Ihres Weihnachtskuchens und schliessen Sie die Spiegel, bis sie die Seiten des Kuchenstückchens berühren, so sehen Sie auf einmal einen ganzen Kuchen erscheinen.

Es ist jetzt Zeit, eine andere Klasse optischer Erscheinungen zu betrachten, welche von dem Grade der Geschwindigkeit abhängen, mit welcher die Wellen sich fortpflanzen. Ich habe Ihnen erzählt, wie schnell sie die Luft durchheilen, 300 000 Kilometer in einer Secunde oder etwa 30 Centimeter in dem tausendmillionten Theil einer Secunde. Schön, aber das Licht geht nicht eben so schnell durch das Wasser wie durch die Luft — es legt im Wasser nur rund 225 000 Kilometer in einer Secunde zurück, d. h. nur 25 Centimeter in dem tausendmillionten Theil einer Secunde. Die Lichtgeschwindigkeit im Wasser ist nur $\frac{3}{4}$ von derjenigen in Luft und in gewöhnlichem Fensterglas geht das Licht noch langsamer. Im Mittel — denn die Gläser weichen in ihrer Zusammensetzung und somit auch in Bezug auf die Verzögerung ab, welche sie den Lichtwellen ertheilen — schreitet das Licht im Glas nur $\frac{2}{3}$ mal so schnell fort wie in Luft. Während also die Lichtstrahlen durch die Luft 12 Meter zurück legen, pflanzen sie sich in derselben Zeit durch das Glas hindurch nur 8 Meter fort.

Aus dieser verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit folgt nun ziemlich einfach, dass, wenn die Lichtwellen senkrecht auf eine Wasser- oder Glasfläche auffallen, derjenige Theil der Wellenfront, welcher zuerst in das dichtere Mittel (Medium) eintritt, langsamer

bricht mehr als Wasser; schwere Krystallgläser, welche Blei enthalten, brechen stärker als leichte Crown-Gläser, wie man sie für die Fensterscheiben und Flaschen benutzt. Andere Substanzen haben wiederum ein höheres Brechungsvermögen im Vergleich zu den schwerstbrechenden Gläsern.

Jetzt können wir dazu übergehen, mittels der brechenden Substanzen Convergenz und Divergenz der Wellen hervorzubringen, da wir leicht eine gekrümmte Wellenfläche erhalten, wenn wir aus der Verzögerung Nutzen ziehen, welche die Wellen in dem Wasser oder Glas erfahren. Wollen wir z. B. eine ebene Welle so umwandeln, dass sie sich in einem Brennpunkt vereinigt, so brauchen wir nur den mittleren Theil der Wellenfront ein wenig zu verzögern, sodass die anderen Theile im Vergleich zur Mitte einen Vorsprung gewinnen. Dann wird die Wellenfläche concav und zielt nach einem Punkte hin. Welche Form

eines Glasstückes dies thun wird? Ein blosses Stück Fensterglas thut es nicht. Ein dickes Stück von überall gleicher Dicke wird es ebenfalls nicht leisten. Es ist klar, dass es ein Stück Glas sein muss, welches an der einen Stelle dicker ist, als

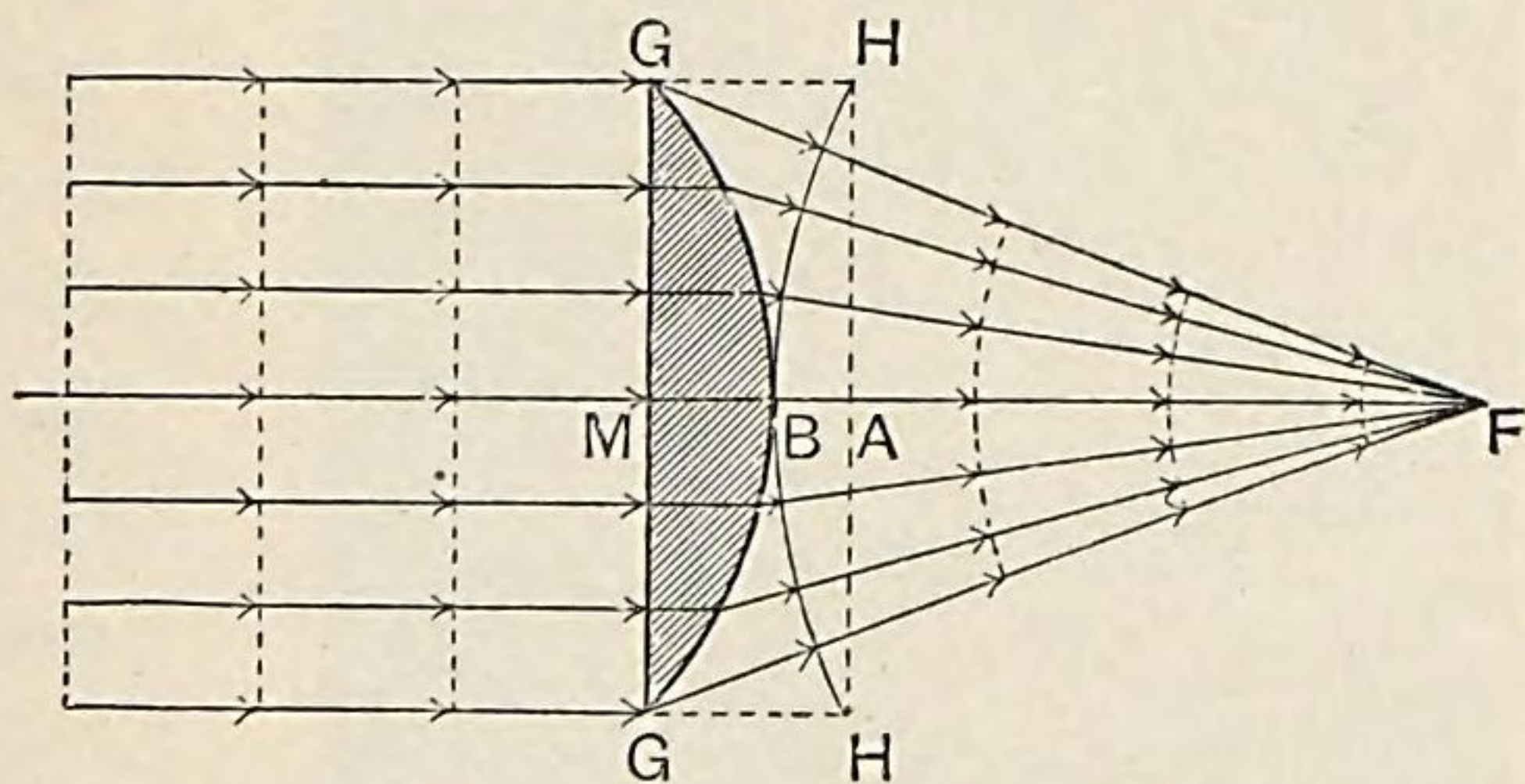


Fig. 20.

an der anderen. Gut, nehmen wir ein Glasstück, dessen Dicke von der Mitte zum Rande stetig abnimmt, und sehen zu, was dasselbe bewirkt. Wir wollen annehmen, es kommt eine ebene Welle und fällt auf die ebene Fläche $G M G$ (Fig. 20) eines Glasstückes, dessen andere Fläche ausgebaucht, also convex ist. Wir gehen aus von dem Zeitpunkt, in welchem die Welle bei $G G$ angekommen ist. Wo wird sie einen Moment später sein? Der mittlere Theil der Welle, welcher bei M auffällt, geht durch das Glas bis B . Wir wissen, dass die Strecke $M B$ nur $\frac{2}{3}$ von derjenigen ist, welche die Welle in derselben Zeit in Luft zurücklegt. Wäre die Welle also in Luft weiter gegangen, so wäre sie bis A gelangt, wobei die Distanz gerade anderthalb mal so gross ist wie $M B$. Die seitlichen Theile der Welle bei G gehen fast nur durch Luft; sie haben also einen Vorsprung vor dem mittleren. Demnach wird die neue Wellenfront anstatt eben zu sein wie $H A H$, die concave Krümmung $H B H$ annehmen und sich schliesslich beim weiteren Fortschreiten in dem

Brennpunkt F vereinigen.¹⁾ Das Resultat wäre dasselbe, wenn wir die Linse umkehrten, sodass die gewölbte Seite dem ankommenden Lichte zugekehrt ist; auch jetzt würde sie die ebene Welle in eine concave verwandeln, welche sich beim Fortschreiten in ihrem Brennpunkt vereinigt. Genau so spielt sich der Vorgang bei dem Brennglase ab.

Mit meiner Wasserrinne bin ich im Stande, diese Wirkung nachzuahmen; freilich nicht sehr exact, insofern die einzige Art und Weise, die Wasserwellen zu verlangsamen, darin besteht, das Wasser da, wo eine Verzögerung eintreten soll, seichter zu nehmen. Ich bewerkstellige dies dadurch, dass ich eine Glasplatte von geeig-

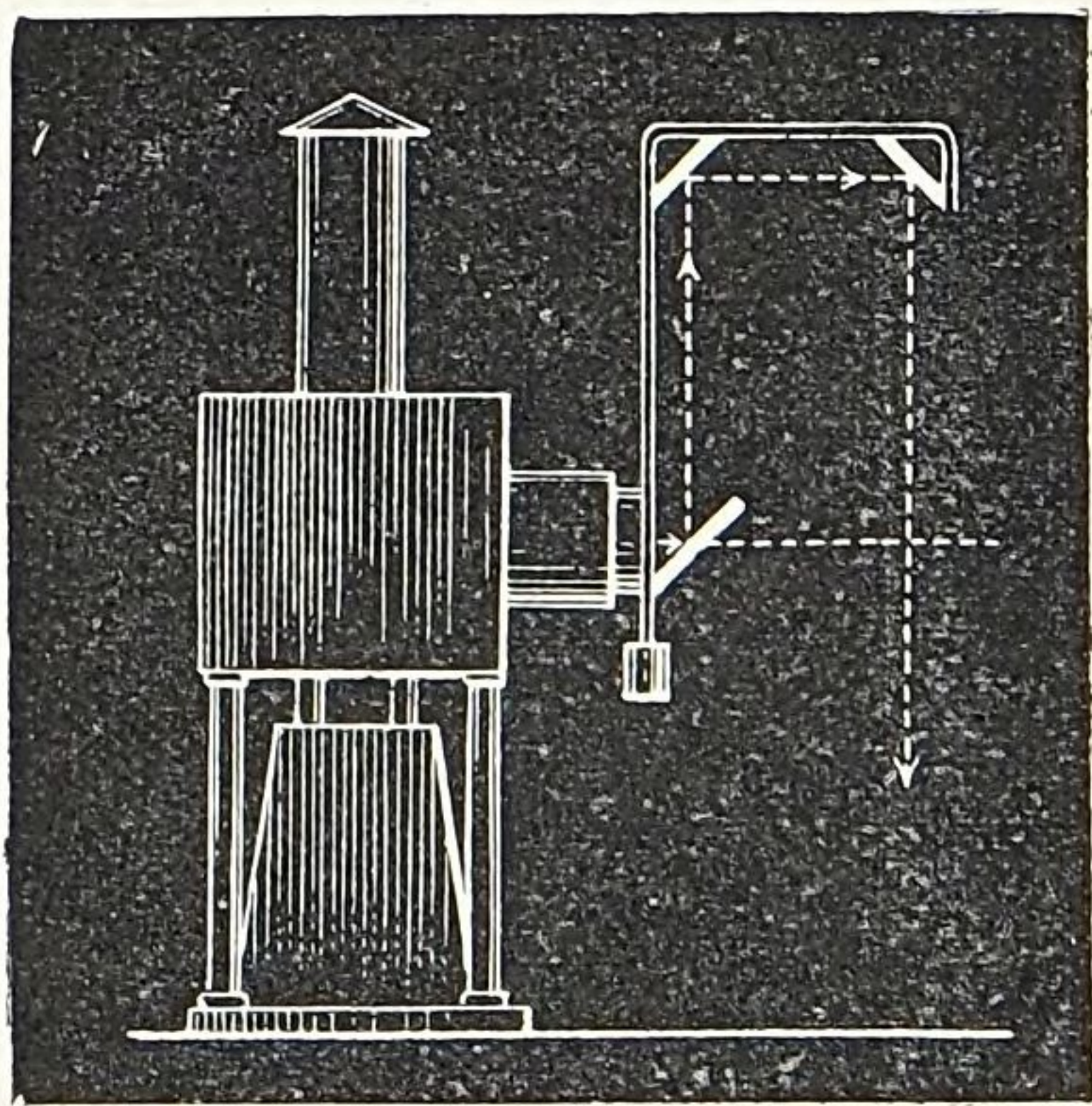


Fig. 21.

neten Form in das Wasser eintauche. Wenn die Wellen über den Rand der eingetauchten Glasplatte laufen, gehen sie langsamer vorwärts. Treffen sie aber den Rand schief, so wird ihre Richtung geändert, sie werden gebrochen. Ueberschreiten sie ein linsenartiges Glasstück, so werden sie gegen den Brennpunkt gerichtet.

Lehrreicher ist es jedoch, diese Versuche mit den Wellen des Lichtes selbst anzustellen. Zuvor lassen Sie mich Ihnen die Brechung

an einem optischen Kreise zeigen, und zwar mit Hülfe eines Apparates²⁾ (Fig. 21), welcher das Lichtbündel unter jedem beliebigen

1) Aus Fig. 20 ist leicht zu ersehen, dass, wenn $MB = \frac{2}{3} MA$ ist, die Krümmung der Welle gerade halb so gross ist, wie diejenige der Glasoberfläche; hieraus folgt, dass die Brennweite der Planconvexlinse (vorausgesetzt, dass das Glas den Brechungsindex 1,5 hat) gerade gleich dem doppelten Krümmungsradius der gewölbten Glasoberfläche ist. In dem Falle einer biconvexen Linse verursacht jede Glasoberfläche eine Krümmung der Wellenfläche. Siehe Anhang zu Vorlesung I.

2) Dieser Apparat, der an jeder Laterne angebracht werden kann, besteht aus drei ebenen, unter 45 Grad zum Horizont geneigten Spiegeln, die alle an einem Arm befestigt sind, welcher sich, wie Fig. 21 es zeigt, mit der Röhre des Licht-Condensors fest verbunden drehen lässt. Nach dreimaliger Reflexion ist das Lichtbündel senkrecht zur Achse der Condensorlinsen gerichtet, dieselbe schneidend. Durch Drehen des Armes um die Condensor-Röhre kann dem Bündel jede Richtung gegeben werden.

Winkel gegen das Centrum des Kreises zu richten erlaubt. Ich benutze jetzt einen grossen optischen Kreis mit seiner Vorderfläche nach Ihnen zu, mit seiner Hinterfläche aber zur Laterne gerichtet, und werfe das Lichtbündel senkrecht auf die Oberfläche eines Glasstückes, dessen untere Fläche die Form eines Halbcylinders besitzt (Fig. 22). Das gebrochene Bündel tritt unter einem vom Einfallswinkel verschiedenen Winkel aus, und zwar ist seine Richtung durch die Verzögerung im Glase steiler geworden. Wenn Sie die Winkel messen, freilich nicht in Winkelgraden, sondern durch die geraden Strecken (AB beziehentlich CD) quer durch den Kreis, so werden Sie finden, dass für die von mir benutzte Glasart das Verhältniss zwischen der Länge CD (dem Sinus des Brechungswinkels COD) und der

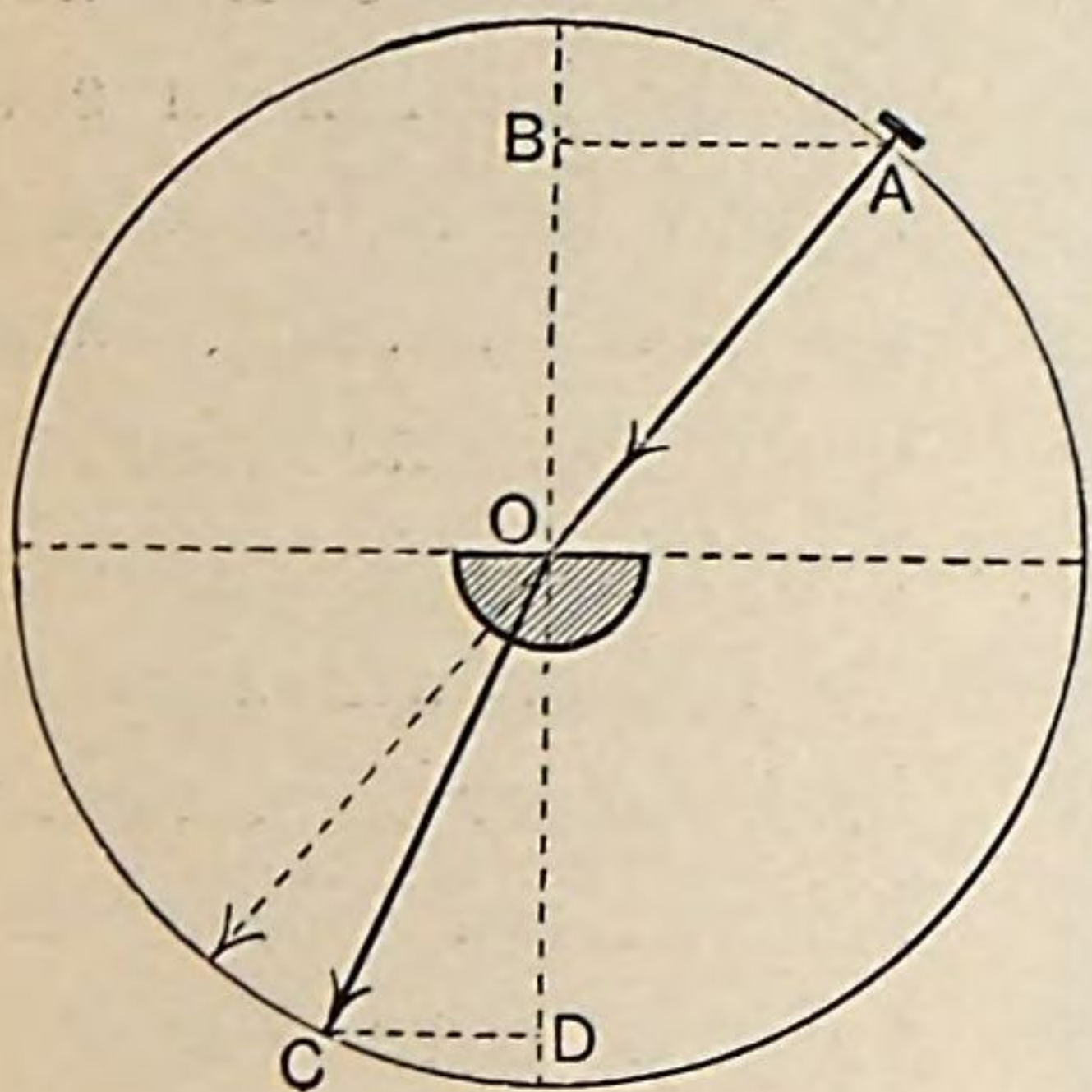


Fig. 22.

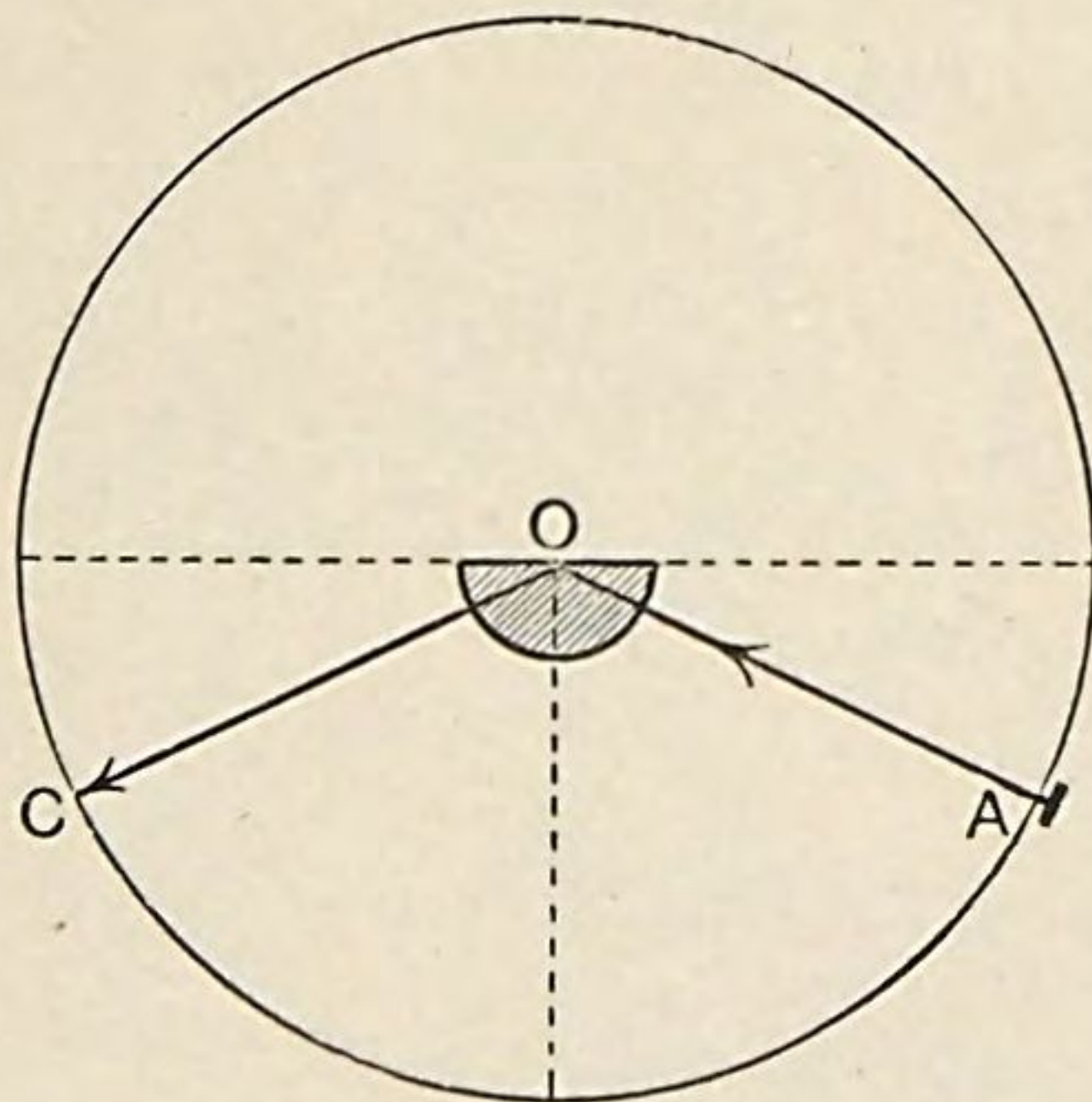


Fig. 23.

Länge AB (dem Sinus des Einfallswinkels AOB) stets den Werth $\frac{2}{3}$ besitzt, welches auch die Richtung des einfallenden Strahles sei. Fällt das Bündel unter streifender Incidenz ein, so wird es zum grössten Theil reflectirt und tritt nicht mehr in das Glas ein, während der eintretende Theil unter einem Winkel gebrochen wird, welchen man als den „kritischen“ oder „Grenzwinkel“ der Totalreflexion bezeichnet.

Mit demselben optischen Kreis kann ich Ihnen ein anderes Phänomen zeigen, dasjenige der totalen inneren Reflexion. Sende ich das Licht durch die Halbkugel (Fig. 23) aufwärts, unter einem Winkel, welcher den „Grenzwinkel“ übertrifft, so kommt nichts davon oberhalb der Oberfläche zum Vorschein, alles wird an ihr wieder nach unten reflectirt, gleich als ob die Glasoberfläche ein polirter vollkommener Spiegel wäre. Sie können denselben Effect erzielen, wenn Sie einen Löffel in ein mit Wasser gefülltes Trinkglas tauchen.

Das Phänomen der totalen Reflexion kann sehr schön an einer leuchtenden Fontaine oder einem Wasserfall illustriert werden. Ich lasse Wasser aus einer engen Röhre ausfliessen und werfe von hinten durch ein Fenster Licht in den Behälter, aus welchem das Wasser fliesst. Es beschreibt das Wasser beim Fallen eine Parabel; der Wasserstrahl aber wird im Innern auf seiner ganzen Länge vom Licht begleitet, bis der Strahl sich in Tropfen auflöst (Fig. 24).

Die Lichtfortleitung kann auch dadurch gezeigt werden, dass man Licht in das eine Ende eines soliden Glasstabes sendet, in

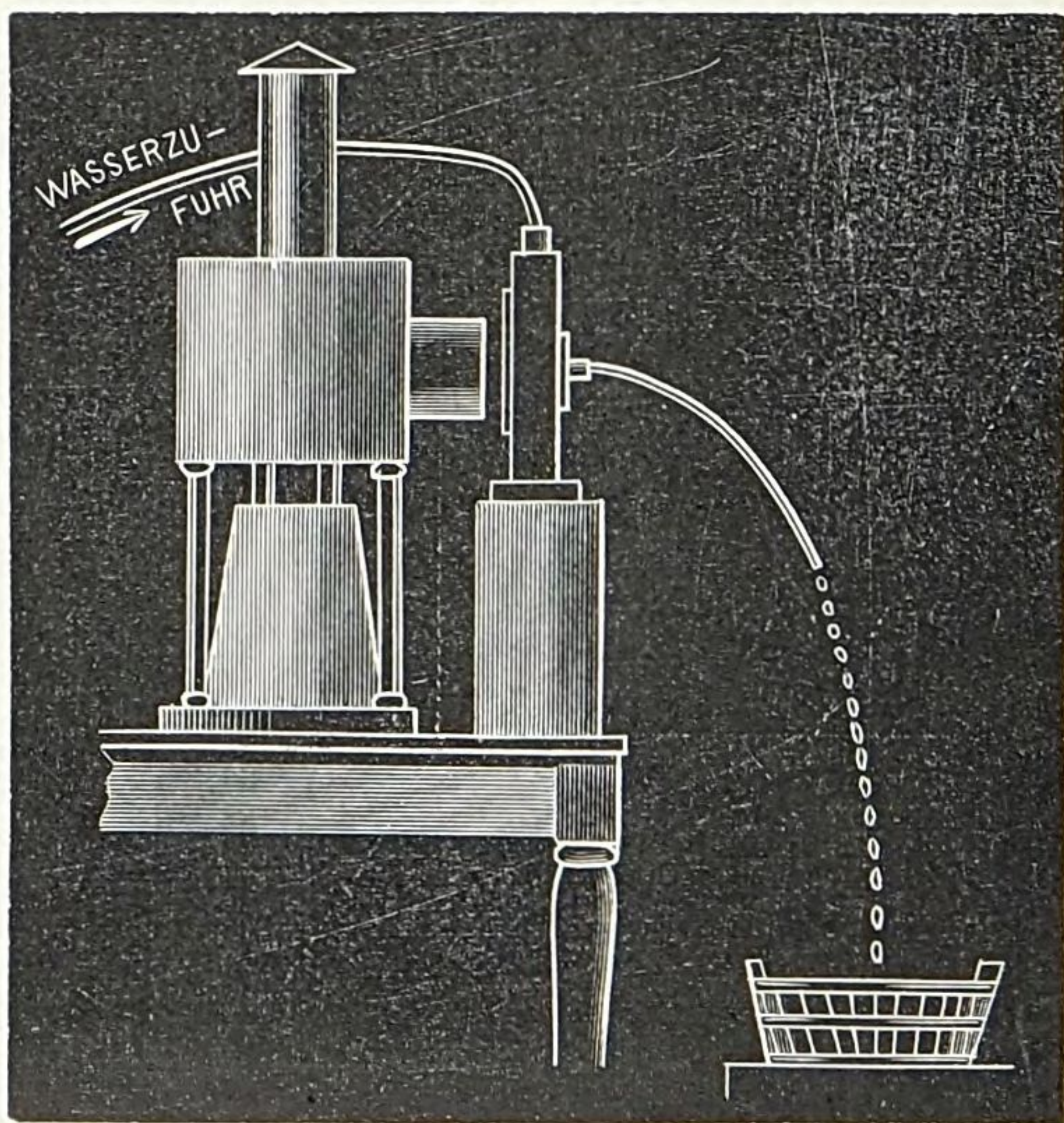


Fig. 24.

welchem es bis zum Ende des Stabes fortschreitet, ohne unterwegs auszutreten. Diese Lichtfortleitung im Innern eines massiven Glasstabes findet auch noch statt, wenn der Stab keine allzu starken Biegungen macht.

Indem wir zum Gebrauche der Linse zurückkehren, um Wellen convergent oder divergent zu machen, wollen wir unsere Laterne so justiren, dass sie ein cylindrisches Strahlenbüschel von einander parallelen Strahlen aussendet und

in den Strahlengang eine Linse bringen, welche am Rande dünner ist als in der Mitte. Sogleich beobachten wir — Dank dem in der Luft vorhandenen Staub —, dass die Wellen nach einem Brennpunkt bei *E* (Fig. 25) convergiren. Das ist wieder ein realer Focus. Eine Linse, welche in der Mitte dicker ist als am Rande, wird eine Convex- oder Sammellinse genannt.

Hätten wir eine Linse genommen, welche umgekehrt in der Mitte dünner ist als am Rande — eine Concavlinse (Fig. 26) — so wäre der Effect ein umgekehrter gewesen. Da die dünnere Mitte die Wellenmitte weniger verzögert als die dichteren Randpartieen der Linse die seitlichen Theile der Welle verzögern, so gewinnt der mittlere Wellentheil gegenüber dem Rand, und die Welle tritt mit

einer gewölbten, convexen Gestalt aus, so dass sie beim Fortschreiten immer grössere Dimensionen annimmt, gleich als ob sie von einem Punkt vor der Linse her käme. Eine solche Linse nennt man eine Zerstreuungslinse.

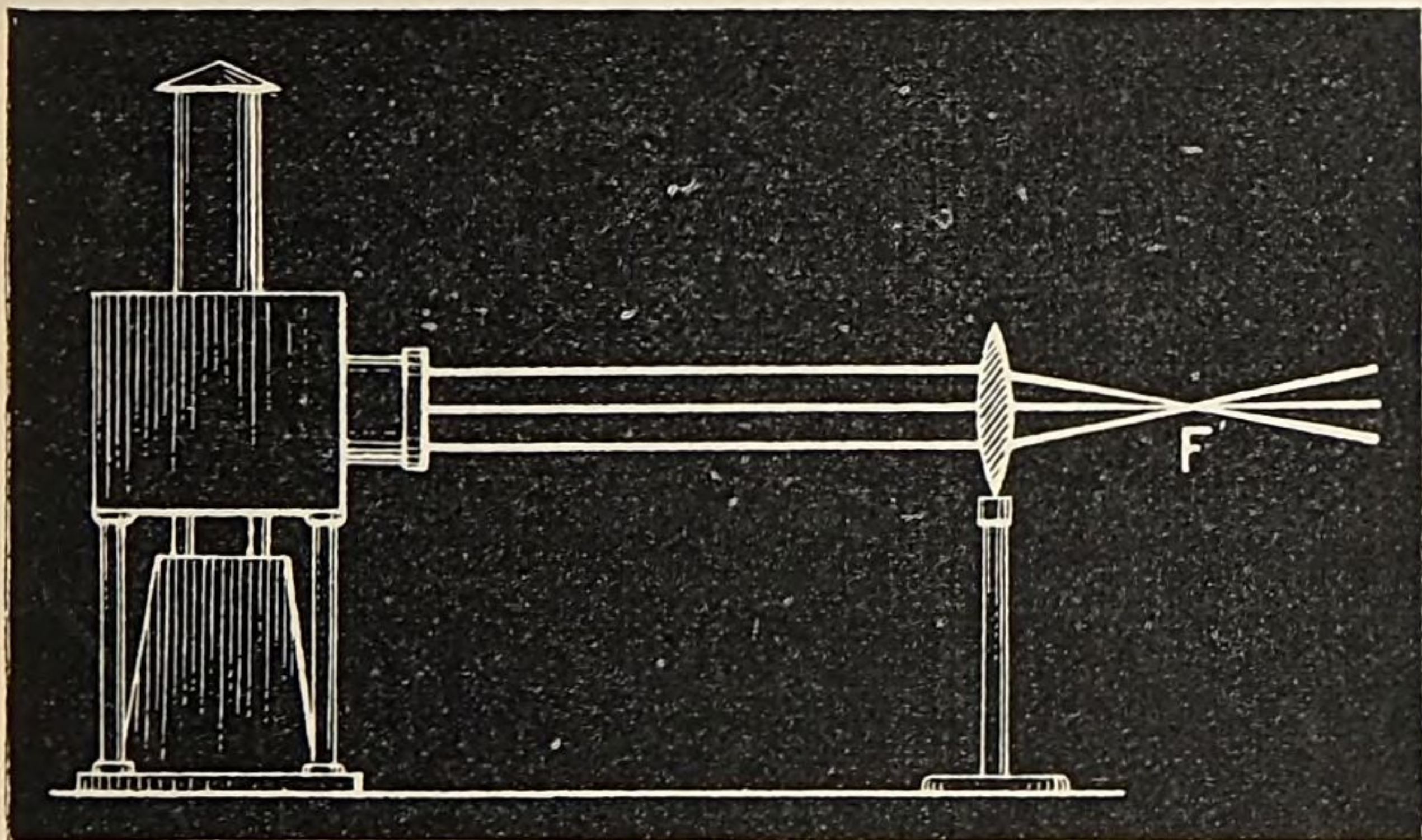


Fig. 25.

Sie werden nicht mehr daran zweifeln, dass die Eigenschaft der Linsen, Licht zu sammeln oder zu zerstreuen, von der Tatsache abhängt, dass Licht im Glas langsamer fortschreitet als in Luft. Sie werden sich aber vielleicht fragen, was wohl eintreten würde,

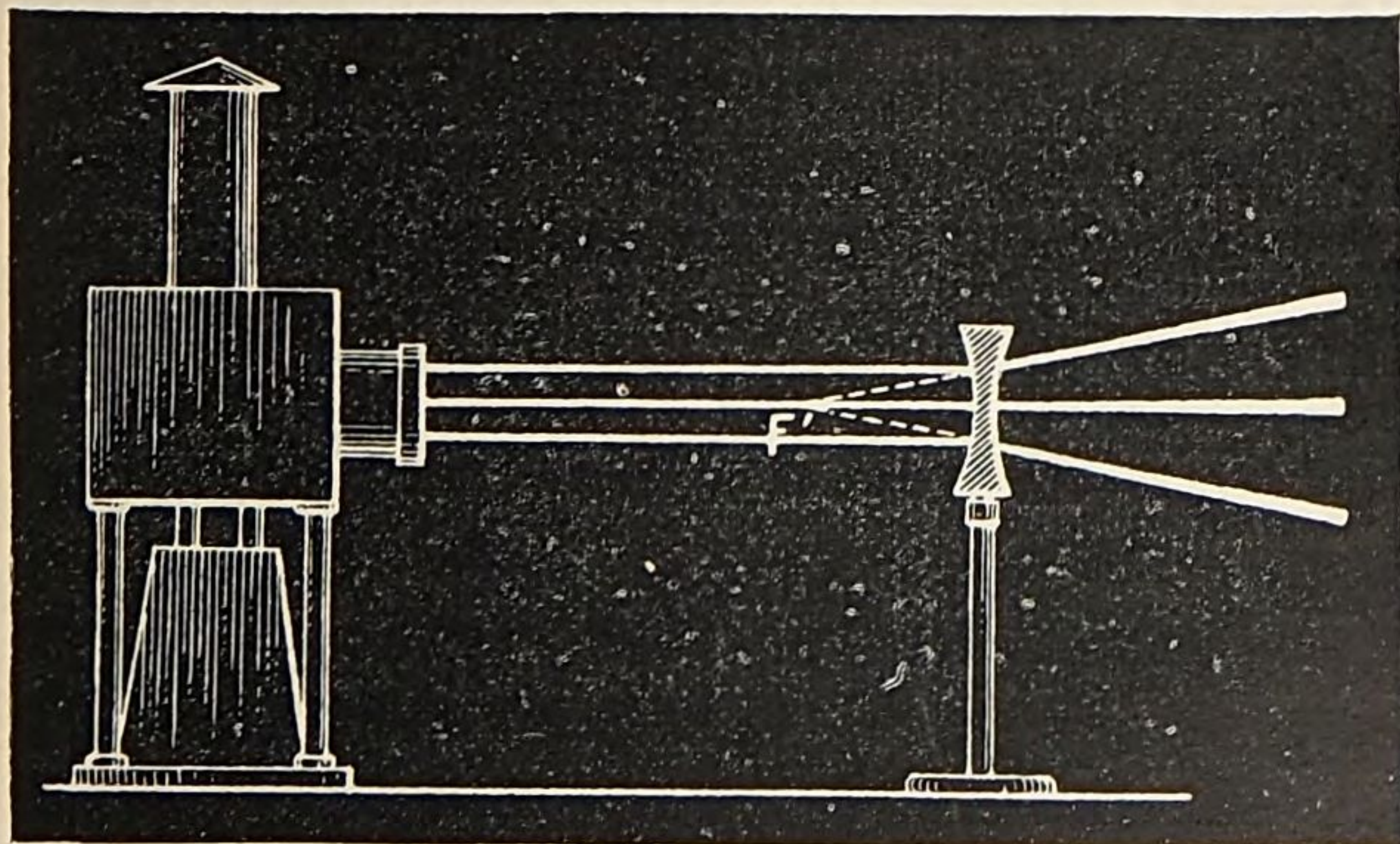


Fig. 26.

wenn keine Änderung der Lichtgeschwindigkeit vorhanden wäre? Gut, wir können diese Frage sehr leicht entscheiden. Wenn die Wirkung der Linse von der Differenz der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes im Glas und dem umgebenden Medium abhängt,

was müsste dann eintreten, wenn wir die Glaslinse mit einem anderen Mittel umgeben würden als mit Luft? Versuchen wir es einmal mit Wasser. Die Geschwindigkeit des Lichtes im Wasser ist kleiner als in Luft — sie ist näher derjenigen im Glas. Wenn also die Wirkung abhängt von der Differenz der Geschwindigkeiten, dann muss nothwendig eine Glaslinse, eingetaucht in Wasser, eine geringere Wirkung hervorbringen als die Glaslinse in Luft. Versuchen Sie es selbst, und Sie werden sehen, dass, wenn Sie ein Vergrößerungsglas ins Wasser tauchen, es nicht mehr so oftmals vergrößert, als wenn es in Luft sich befindet.

Ein Brennglas macht die Strahlen weniger convergent, wenn es in Wasser getaucht ist; sein Brennpunkt liegt weiter ab. Jetzt habe ich hier eine Linse, welche, wie Sie sehen, unzweifelhaft ver-

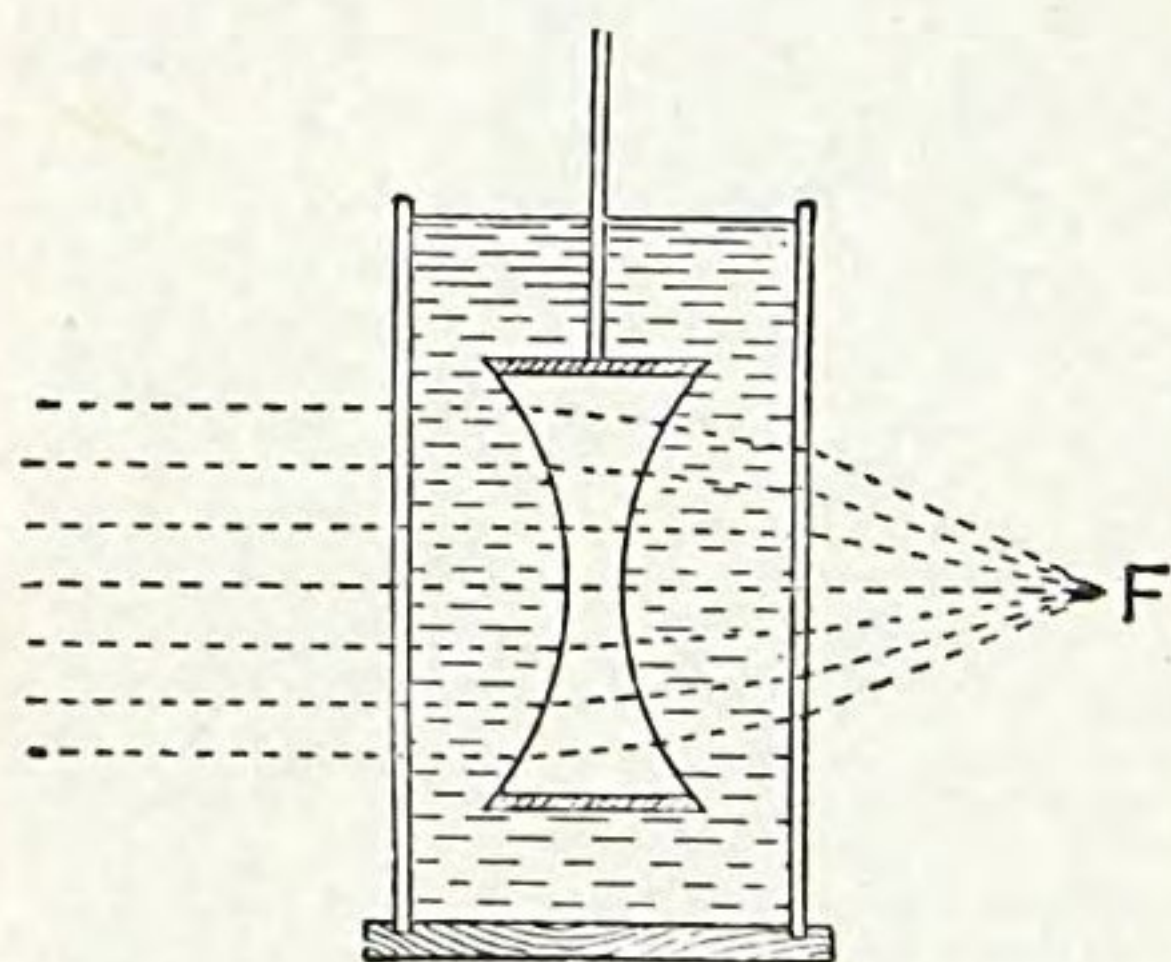


Fig. 27.

größert. Ich tauche sie in dieses Bad von Oel — und siehe da, sie wirkt wie eine Zerstreuungslinse — sie macht das Bündel divergent anstatt convergent! Gehen wir weiter und ziehen wir die Schlussfolgerung daraus. Wenn die Wirkung des umgebenden Mittels so bedeutend ist, was würde dann der Effect sein, wenn wir eine Linse von Luft nähmen (eingeschlossen zwischen zwei dünnen Glaswänden) und dieselbe mit

einem Bade von Wasser oder Oel umgeben würden? Wenn unsere Theorie richtig ist, so müsste eine Zerstreuungslinse aus Luft, eingetaucht in Oel, wirken wie eine Sammellinse von Glas in Luft und eine Sammellinse aus Luft, eingetaucht in Oel, wie eine Zerstreuungslinse aus Glas in Luft. Lassen Sie uns diese Schlussfolgerung prüfen. Hier ist eine Concavlinse aus Luft. Rings von Luft umgeben, wirkt sie weder wie eine Sammellinse noch wie eine Zerstreuungslinse — die Geschwindigkeit innerhalb und ausserhalb der Linse ist eben dieselbe und darum ist keine brechende Wirkung vorhanden. Aber tauchen wir sie in Oel (Fig. 27), so vereinigt sie das Bündel in einem realen Brennpunkt (F) genau ebenso wie es eine gläserne Sammellinse in Luft thun würde.

Lassen Sie mich das Resultat dieses Theiles meines Themas dahin zusammenfassen, dass ich sage, Linsen und gekrümmte Spiegel ändern den Gang der Lichtwellen, insofern sie den Wellenflächen neue Krümmungen aufdrücken. In der That können, exact gesprochen, alle Linsen oder Spiegel oder Combinationen derselben

nichts weiter bewirken, als eine Veränderung der Krümmung der dieselben treffenden Wellenflächen.

Das Auge, das wundervollste aller optischen Instrumente, ist auch eine Combination von Linsen innerhalb eines knorpeligen Hohlraums, dessen Hinterwand auf seiner inneren Fläche mit einer ausserordentlich feinen Structur von empfindlichen Zellen bedeckt ist, innerhalb deren zweigartig der Sehnerv ausgebreitet liegt. Was der Sehnerv thun kann, ist weiter nichts, als die auf ihn irgendwie ausgeübten Eindrücke fühlbar zu machen und diese Reize dem Gehirn zu übermitteln. Alles andere muss einerseits durch den Linsenapparat gethan werden, welcher die Lichtwellen auf der Netzhaut vereinigt, andererseits durch das Gehirn, welches die Eindrücke, die ihm vom Nerv übermittelt werden, in Empfindungen umwandelt. Wir haben uns hier aber weder mit der Nervenstructur, noch mit dem Gehirn zu beschäftigen. Uns interessirt das Auge nur insofern, als es ein optischer Apparat ist, der aus einer Combination von Linsen bestehend von den äusseren Gegenständen Bilder auf der Netzhaut entwirft.

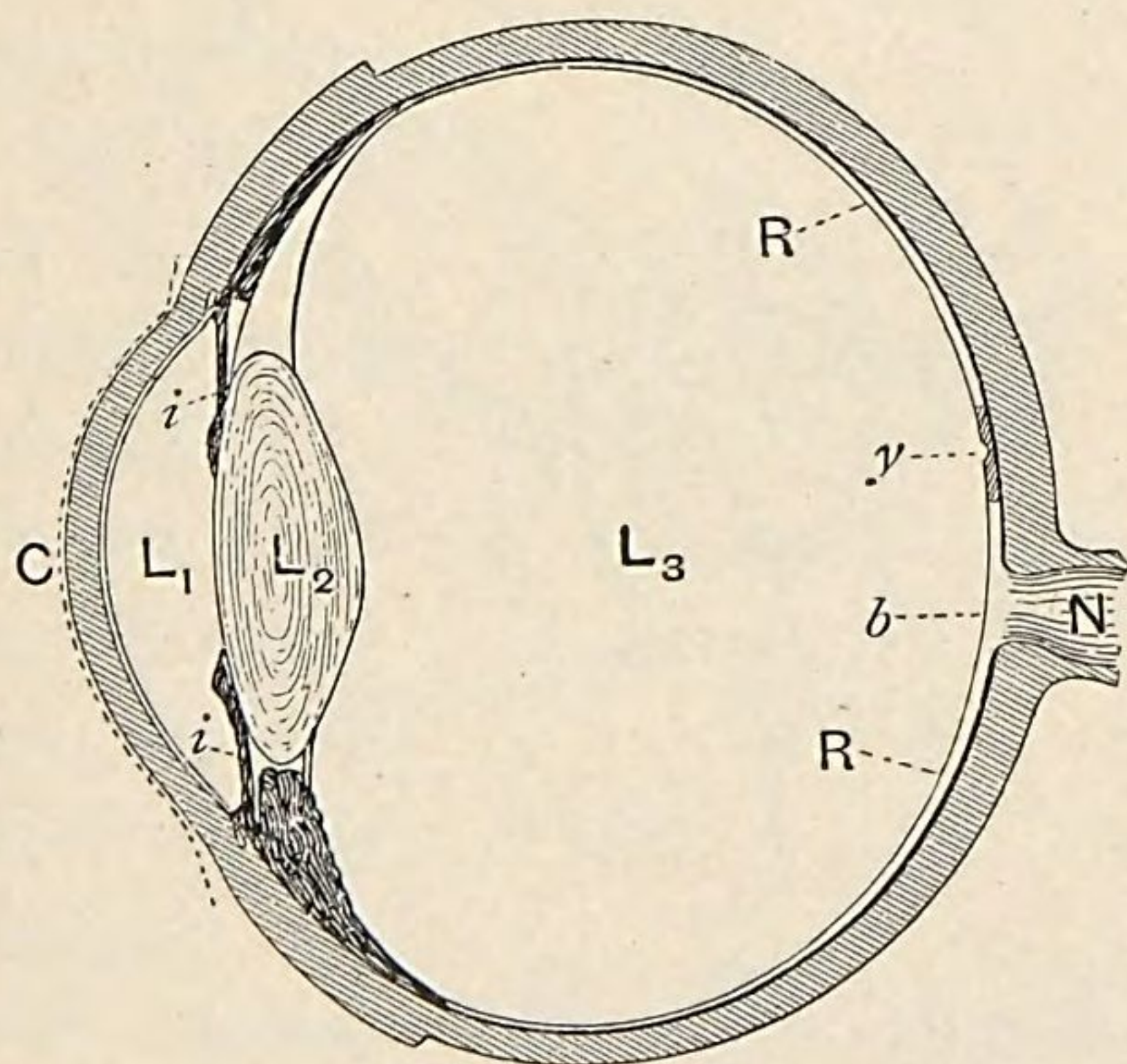


Fig. 28.

Betrachten Sie die Skizze des menschlichen Auges, wie es in Fig. 28 dargestellt ist. Zum grössten Theil wird die Brechung bewirkt durch die Krystalllinse (L_2), welche aus einer durchsichtigen, knorpeligen Substanz besteht und hinter der Iris oder dem gefärbten Diaphragma (i) des Auges gelegen ist. Die Pupille oder das Loch in der Iris führt geradenwegs zur Mitte der Krystalllinse des Auges. Die Linse ist wiederum eingebettet in ein Medium oder besser zwischen zwei Medien, ein wässeriges Medium (L_1) vorn und ein gallertartiges Medium (L_3) dahinter; letzteres füllt auch das Uebrige der Augenkammer ganz aus. Die Krystalllinse hat infolgedessen auch eine geringere vergrössernde Kraft, als wenn sie von Luft umgeben wäre. Sie wirkt ähnlich einer in Wasser gelagerten Glaslinse. Aber die wässerige Substanz vor der Augenlinse wirkt ebenfalls wie eine Linse, da sie den Raum einnimmt zwischen der Augenlinse und der durchsichtigen Cornea, dem gewölbten „Fenster“

des Auges. Alle diese Linsen bilden zusammen eine Linsencombination, welche geeignet ist, Bilder von den äusseren Gegenständen auf dem hinteren Schirm oder der Netzhaut (*R*) zu entwerfen, wo die empfindlichen Nerven ausgebreitet liegen. Was das Auge als optischer Apparat vermag, kann auch durch optische Combinationen von Linsen nachgeahmt werden. Eine photographische Camera kann als eine Art künstliches Auge betrachtet werden. Vorn ist eine Combination von Linsen, deren Aufgabe darin besteht, Bilder auf einem dahinter befindlichen Schirm oder auch auf einer chemischen empfindlichen Platte zu entwerfen. Um die Analogie noch vollständiger zu machen, müsste man sich das Auge als eine Camera vorstellen, in welcher der Raum zwischen Linse und Schirm mit

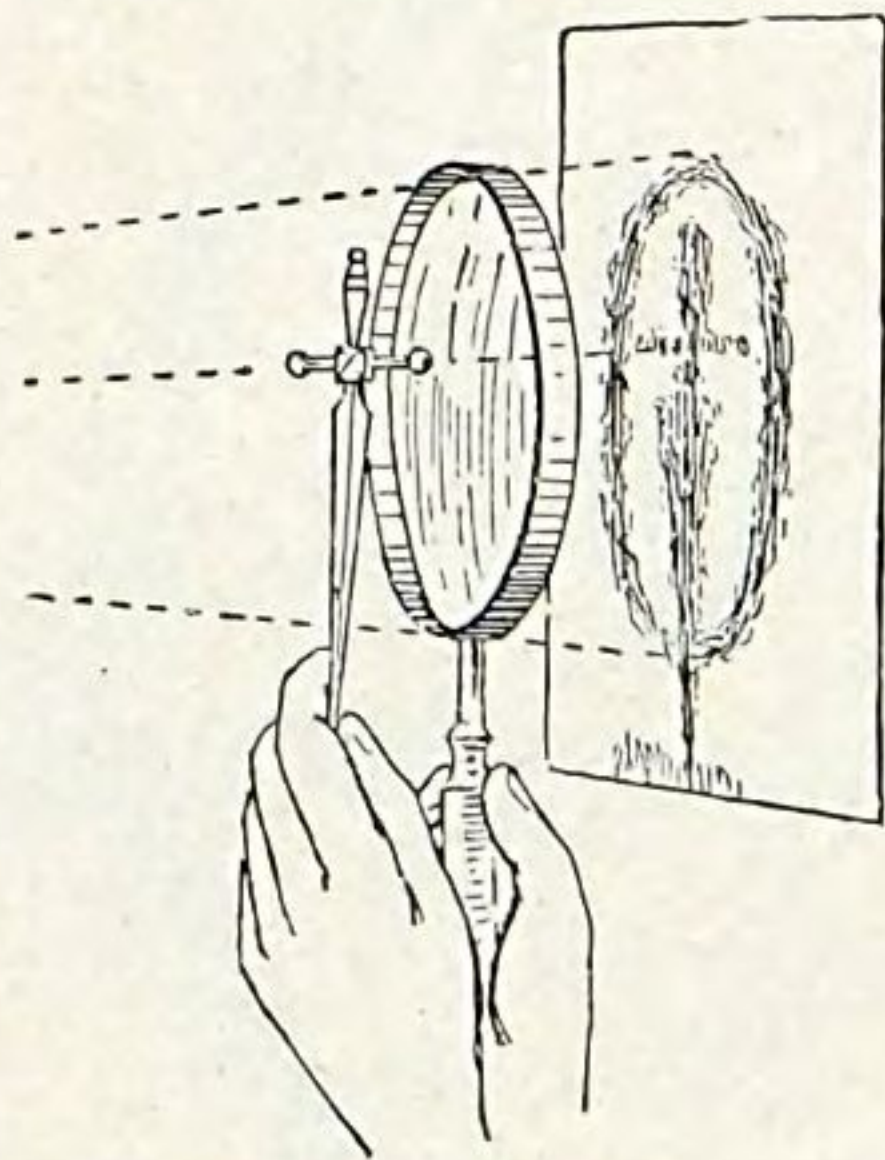


Fig. 29.

einer durchsichtigen wässerigen Gallerte ausgefüllt ist und in welcher auch der Raum zwischen Vorder- und Hinterlinse des Objectivs mit Wasser angefüllt ist.

Wie in der Camera, so sind auch im Augapfel die auf dem Schirm entworfenen Bilder umgekehrte. Wenn Sie nicht schon vorher darüber nachgedacht haben, wird es Ihnen schwer werden, dieses zu glauben, da Sie trotz der umgekehrten Bilder die Objecte aufrecht sehen! Während Sie aber noch ein Kind waren, hat Ihr Gehirn gelernt, den Eindruck auf den unteren bez. oberen Theilen Ihrer Netzhaut zu verbinden mit den Gegenständen, welche oben bzw. unten liegen. Und wie schwer Ihnen die Vorstellung von diesem Vorgange auch werden mag, Thatsache ist, dass die Bilder der Gegenstände auf der Netzhaut Ihrer Augen eine umgekehrte Lage wie die Gegenstände selbst haben.

Ausser dem Beweise, welchen die Bilder einer photographischen Camera liefern, giebt es zwei sehr einfache Versuche, welche die Wahrheit dieser Behauptung bestätigen. Den ersten können Sie zu Hause selbst anstellen; Sie brauchen dazu nur eine Nadel und ein Kartenblatt. Die ihm zu Grunde liegende Erscheinung ist folgende: Halten Sie einen kleinen Gegenstand nahe an eine Linse, so wird ein Schatten desselben durch die Linse entworfen, der aber nicht umgekehrt ist. Hier ist eine Linse — sie zeichnet umgekehrte Bilder von Objecten, falls sie dieselben deutlich auf einem Schirm entwirft. Halten Sie aber ein kleines Object nahe an eine Linse (Fig. 29) und werfen Sie Licht durch dieselbe, so sind die Schatten

wirklich aufrecht auf dem Schirm zu sehen. Jetzt nehmen Sie eine Visitenkarte und stechen mit einer etwas grossen Nadel ein Loch durch dieselbe. Halten Sie das Loch etwa zwei Centimeter vor das Auge und blicken Sie durch dasselbe auf eine weisse Wolke oder auf hell beleuchtete weisse Flächen. Dann halten Sie die Nadel aufrecht zwischen Auge und Loch wie es die Fig. 30 zeigt. Es mag ein wenig Geduld erfordern, um die Erscheinung zu sehen, da Pupille, Kuppe und Loch auf einer geraden Linie liegen müssen. Sie wissen, dass Sie die Nadel mit der Kuppe nach oben halten, dennoch sehen Sie dieselbe mit der Kuppe nach unten gekehrt, wie in Fig. 31. Ebenso wie hier, wo Sie wissen, wie der Schatten der Nadel auf der Netzhaut Ihres Auges liegt und Sie dennoch das Oberste zu unterst sehen, genau so geschieht es im gewöhnlichen Leben: Sie sehen das Object aufrecht, dessen Bild auf der Netzhaut in Wirklichkeit ein umgekehrtes ist.

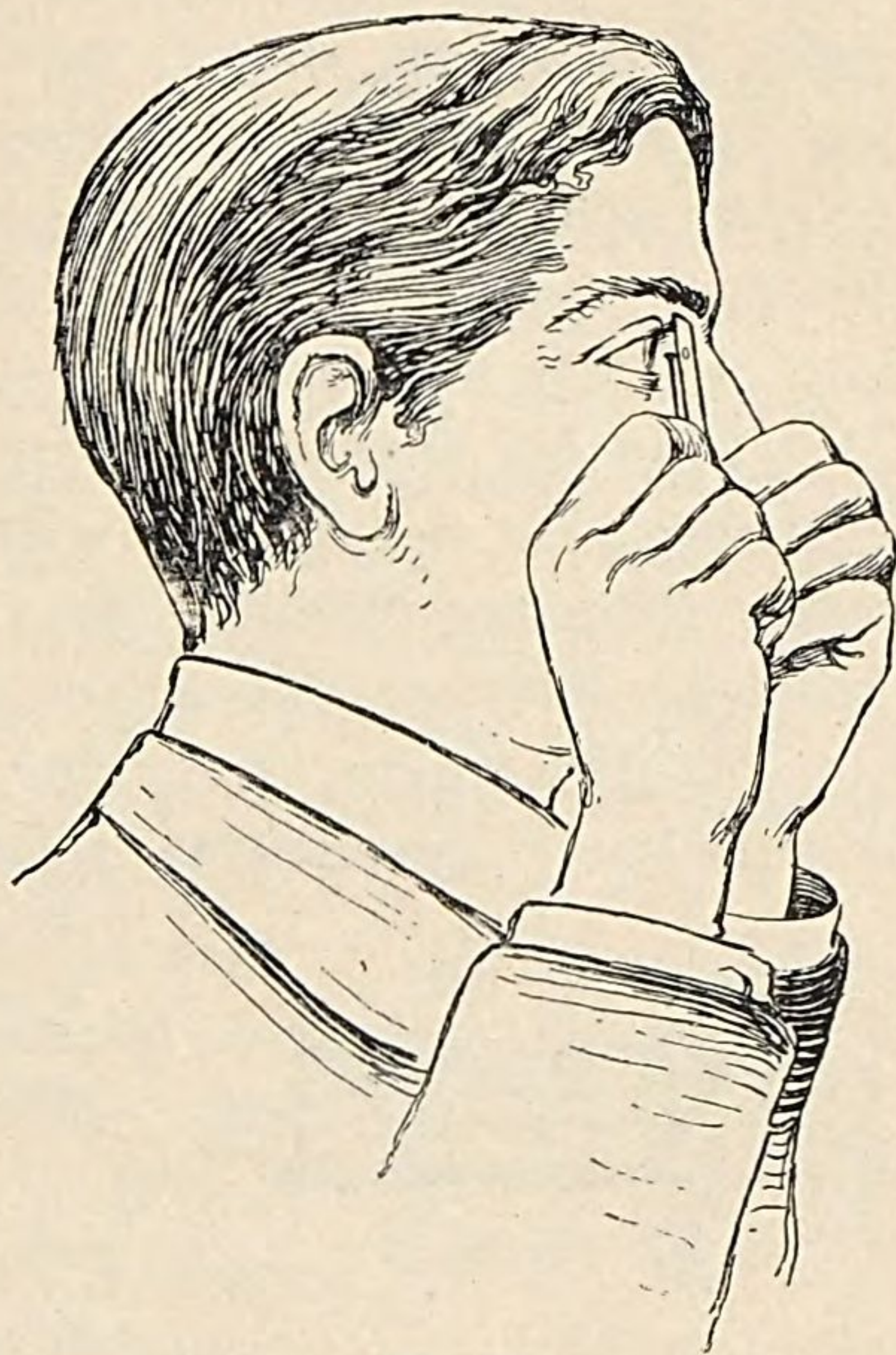


Fig. 30.

Der andere Beweis hat den Vorzug, mehr direct und objectiv zu sein, dafür gelingt er aber auch nicht mit jedem Auge — weil bei einigen Personen die knorpligen Wände des Augapfels zu dick sind. Stellen Sie sich vor einen Spiegel, schliessen Sie ein Auge — sagen wir das rechte — und halten Sie auf derselben Seite eine Kerze in der Hand. Halten Sie die Kerze ungefähr in der Höhe des geschlossenen Auges, sodass ihr Licht gerade am Rücken der Nase vorbei in das offene Auge fällt. Wenn Sie dann sorgfältig blicken, so werden Sie rechts in der äussersten Ecke des Auges ein kleines Bild der Kerzenflamme matt scheinend durch die knorplige weisse Wand sehen — dasselbe ist umgekehrt.¹⁾ Heben Sie die Kerze

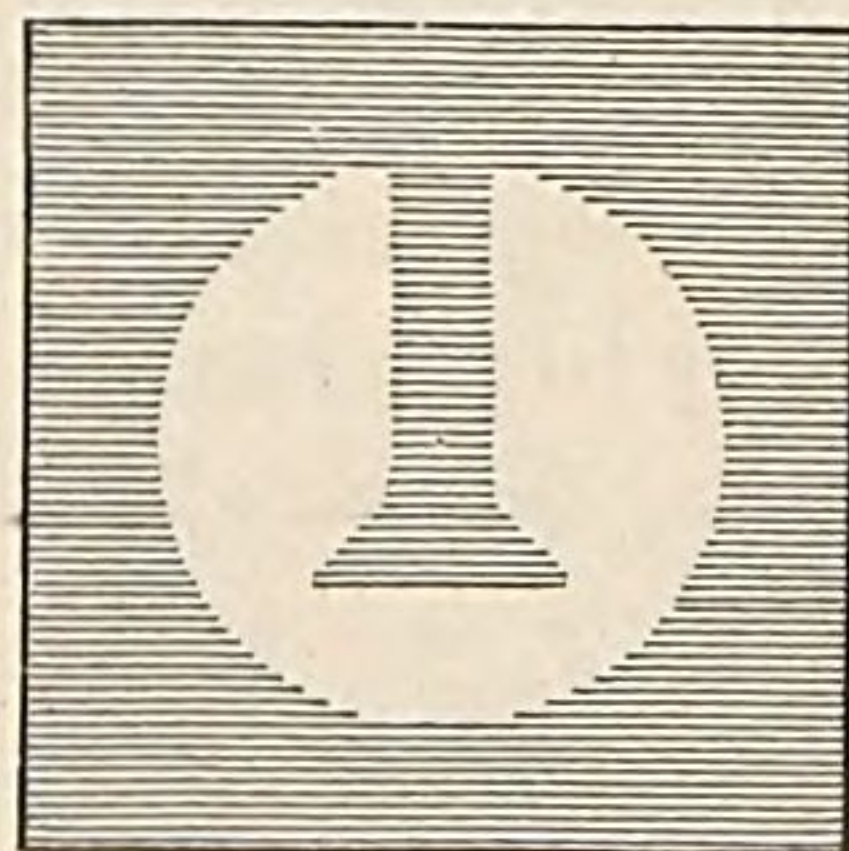


Fig. 31.

1) Dem Uebersetzer ist es leider nicht gelungen, diesen Versuch mit Erfolg zu wiederholen. — *aber sehr Bemerkung*

höher, so geht das Bild tiefer; senken Sie die Flamme, so steigt dasselbe höher.

Ehe wir zu einem anderen Thema übergehen, will ich Ihnen noch einige Experimente zeigen, welche auf dem Phänomen der Brechung des Lichtes beruhen. Wandern die Sonnenstrahlen schräg durch die Atmosphäre zur Erde, wie sie es thun, wenn die Sonne tief am Horizont steht, so werden sie in der Luft gebrochen, und die Sonne scheint höher am Himmel zu stehen, als sie es wirklich ist. In der That kann die Sonne noch über dem Horizont gesehen werden, zu einer Zeit, wo sie ganz ohne Zweifel schon untergegangen ist; dann beschreiben ihre Strahlen über dem dazwischen liegenden Theil des Erdglobus hinweg zu unserem Auge eine gekrümmte Bahn.

Die Umstände, unter denen dies eintreten kann, sind folgende: es müssen die aufeinander folgenden Schichten der Luft verschiedene

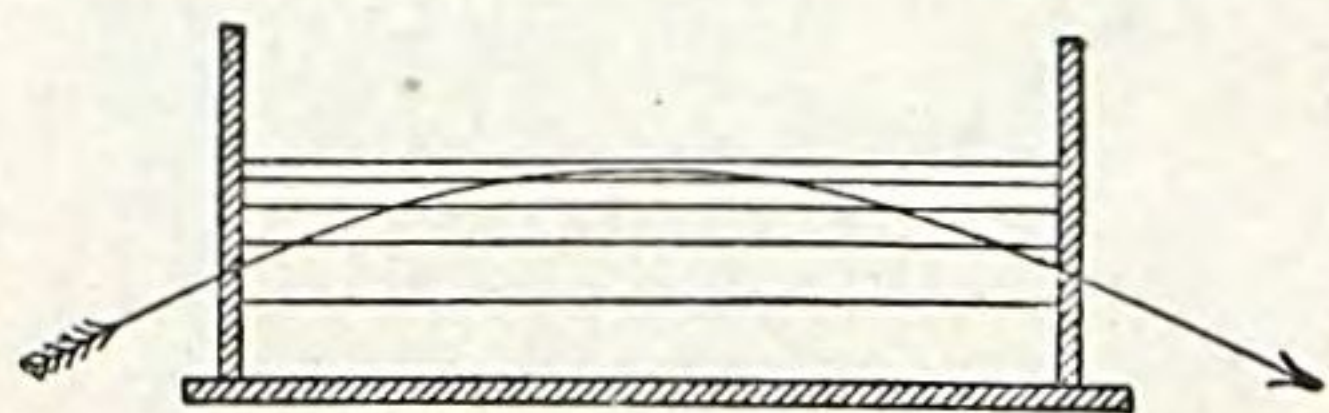


Fig. 32.

Dichtigkeit haben, so zwar, dass die dichtesten zu unterst, der Erde am nächsten, und die dünnsten zu oberst liegen.

Um dieses zu demonstrieren, nehme ich einen Glastrog, in welchen sorgfältig eine Anzahl von Lösungen von verschiedener Dichtigkeit gegossen worden sind, und zwar die dichtesten zu unterst. Sie sehen, dass der in den Trog gesandte Lichtstrahl einen gekrümmten Verlauf nimmt (Fig. 32). In der That, das Licht geht um die Ecke!

Der Unterschied der Brechung, welcher den Unterschied in der Dichtigkeit begleitet, wird sehr schön illustriert durch ein Experiment mit erhitzter Luft. Sie alle wissen, dass erhitzte Luft in die Höhe steigt, dabei immer dünner und dünner werdend, und dass umgekehrt abgekühlte Luft dichter wird und zu Boden fällt. Aber sahen Sie je die heisse Luft von Ihrer Hand oder selbst vom heissen Schüreisen aufsteigen? Oder sahen Sie je die kalte Luft von einem Klumpen Eis abwärts sinken? Und doch ist es ausserordentlich leicht, Ihnen dies zu zeigen. Alles was ich dazu brauche ist ein sehr kleiner leuchtender Punkt.

Wir wollen das Licht einer Bogenlampe benutzen und deren Strahlen durch die kleine Oeffnung eines ihr nahe befindlichen Metallschirmes auf jenen weissen Schirm senden. Jetzt bringe ich dieses heisse Schüreisen in den Strahlengang; Sie sehen seinen Schatten auf dem Schirm und Wirbel heisser Luft, welche vom Eisen aufsteigend ebenfalls Schatten werfen. Hier ist ein Stück

Eis. Die von ihm nach unten sinkende Luft wirft ebenfalls ihre Schatten. Selbst von meiner Hand sehen Sie die heisse Luft aufsteigen. Eine Kerzenflamme wirft sogar einen sehr dichten Schatten, und wenn ich eine Flasche Aether öffne, so sehen Sie, wie der Aetherdampf — welcher für gewöhnlich unsichtbar ist — aus dem Hals der Flasche strömt und niederfällt. Selbst ein Gasstrom offenbart sich, wenn derselbe durch diese Methode untersucht wird.

Ein anderes merkwürdiges Experiment erhält man beim Gebrauch eines Glasstückes als Linse, welches nur in einer Richtung gekrümmt ist (Cylinderlinse), sagen wir von rechts nach links, nicht aber von unten nach oben. Wenn diese Linse längs der ganzen Mitte dicker ist, als an den beiden Rändern rechts und links (Fig. 33 links), so muss sie nothwendig die Dinge von rechts nach links vergrössern, nicht aber von oben nach unten; die Folge davon ist eine Verzerrung der Bilder. Ich entwerfe auf dem Schirm das Bild eines bekannten älteren Herrn. Halte ich jetzt vor dasselbe eine Cylinderlinse, so sehen Sie, wie sein Gesicht verzerrt wird. Und wenn ich die Linse in ihrer Ebene drehe, so werden seine Gesichtszüge in Folge der Verzerrung abwechselnd verlängert und verbreitert. Es giebt auch Cylinderlinsen anderer Art, welche in der Mitte dünner sind als an den Rändern (Fig. 33 rechts). Diese bewirken eine Verzerrung dadurch, dass sie in einer Richtung verkleinern.

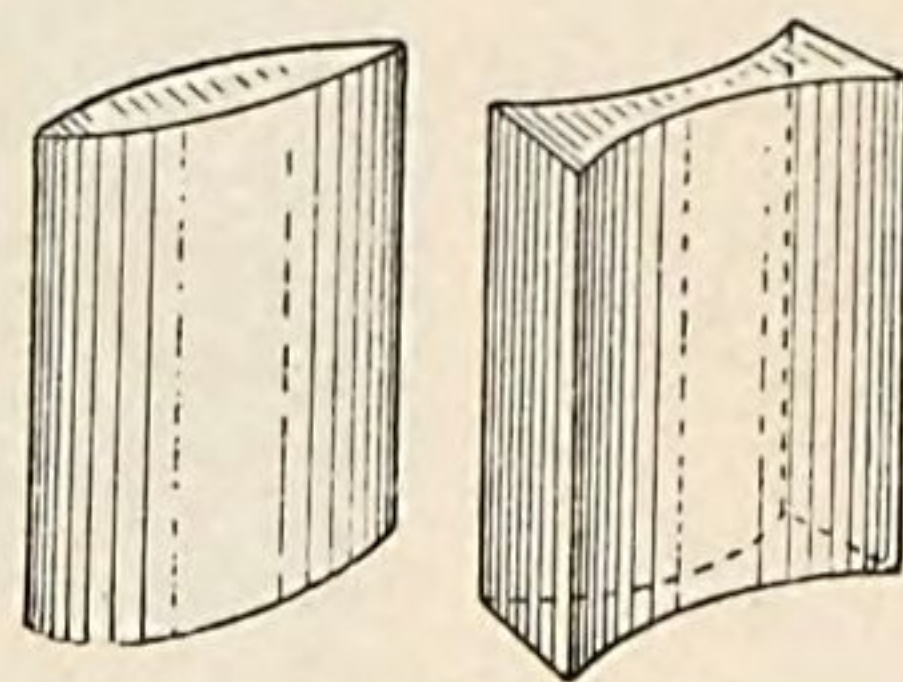


Fig. 33.

Lassen Sie uns jedoch zum Thema zurückkehren, welches ich Ihnen weiter oben auseinander gesetzt habe, dass nämlich alles, was durch die Linsen oder Spiegel erreicht werden kann, nur darin besteht, einer Wellenfläche eine andere Krümmung zu ertheilen. Der schlagendste Beweis dafür wird durch jene jetzt seltene Curiosität, den magischen Spiegel von Japan, geliefert. Im alten Japan waren, noch ehe es westliche Sitten heimgesucht und herabgesetzt hatten, mancherlei Dinge anders als heute. Die Japaner sassen nie auf Stühlen, weil es keine gab, auf denen sie hätten sitzen können. Auch hatten sie noch kein Spiegelglas, vielmehr bestanden ihre Spiegel alle aus polirter Bronze. Und zwar hatten jene interessanten Völker die Kunst des Bronzegiessens und des Spiegelpolirens auf eine Stufe gehoben, welche von keiner anderen Nation vor ihnen erreicht worden ist. Wenn die jungen Damen in Japan im Begriff waren, ihre Haare aufzustecken, so pflegten sie niederzukauern auf einer Matte vor einem reizenden Spiegel, welcher auf einem elegant lackirten Rahmen

stand. Fig. 34 ist die Photographie von einer guten japanischen Zeichnung, welche in meinem Besitz ist. Sie haben vielleicht gesehen, wie die kleine schöne „Yum-yum“ im „Mikado“ genau ebenso vor ihrem Toilettenspiegel niederhockt. Hier (Fig. 35) ist einer jener schönen japanischen Spiegel, rund, schwer und versehen mit



Fig. 34. Japanische Mädchen mit Spiegeln.

einem metallnen Griff. Die eine Fläche ist mit Sorgfalt und grosser Mühe polirt; die andere enthält das Ornament, das in einer Form gegossene Relief, in diesem Falle das Wappen der Kaiserlichen Familie, das Kiri-Blatt (das Blatt der *Paullonia imperialis*) mit der Blumenknospe über demselben. Die polirte Fläche ist leicht convex geschliffen; aber wenn Sie hineinblicken würden, keine von Ihnen, meine jungen Damen, könnte etwas anderes sehen als Ihr eigenes schönes Gesicht oder die Gesichter Ihrer Freundinnen neben Ihnen

oder die Dinge im Zimmer. Sicher würden Sie nichts sehen von dem Ornament (Fig. 35) auf der hinteren Seite des Spiegels. Er ist für Sie bloss ein Spiegel!

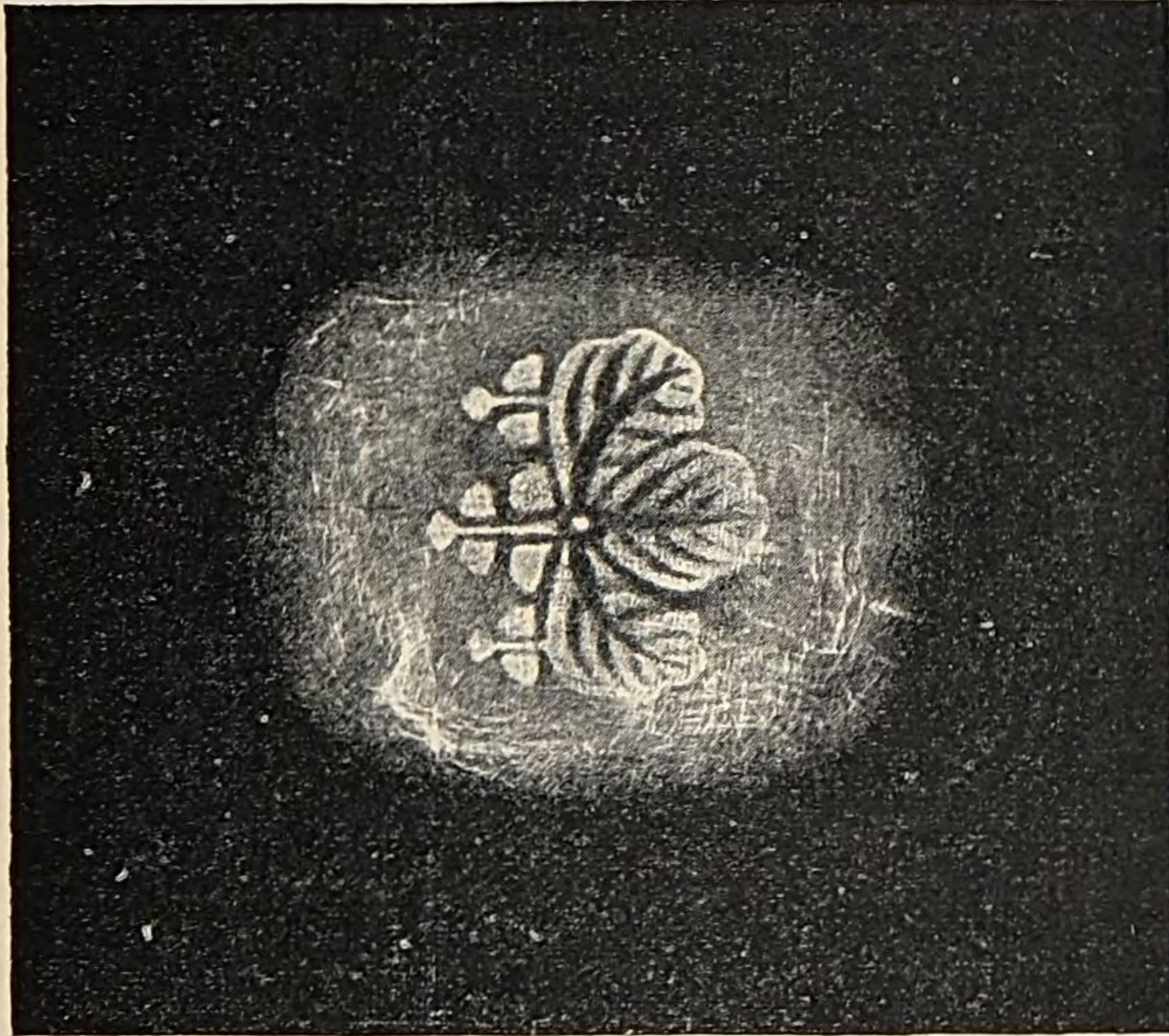


Fig. 36.

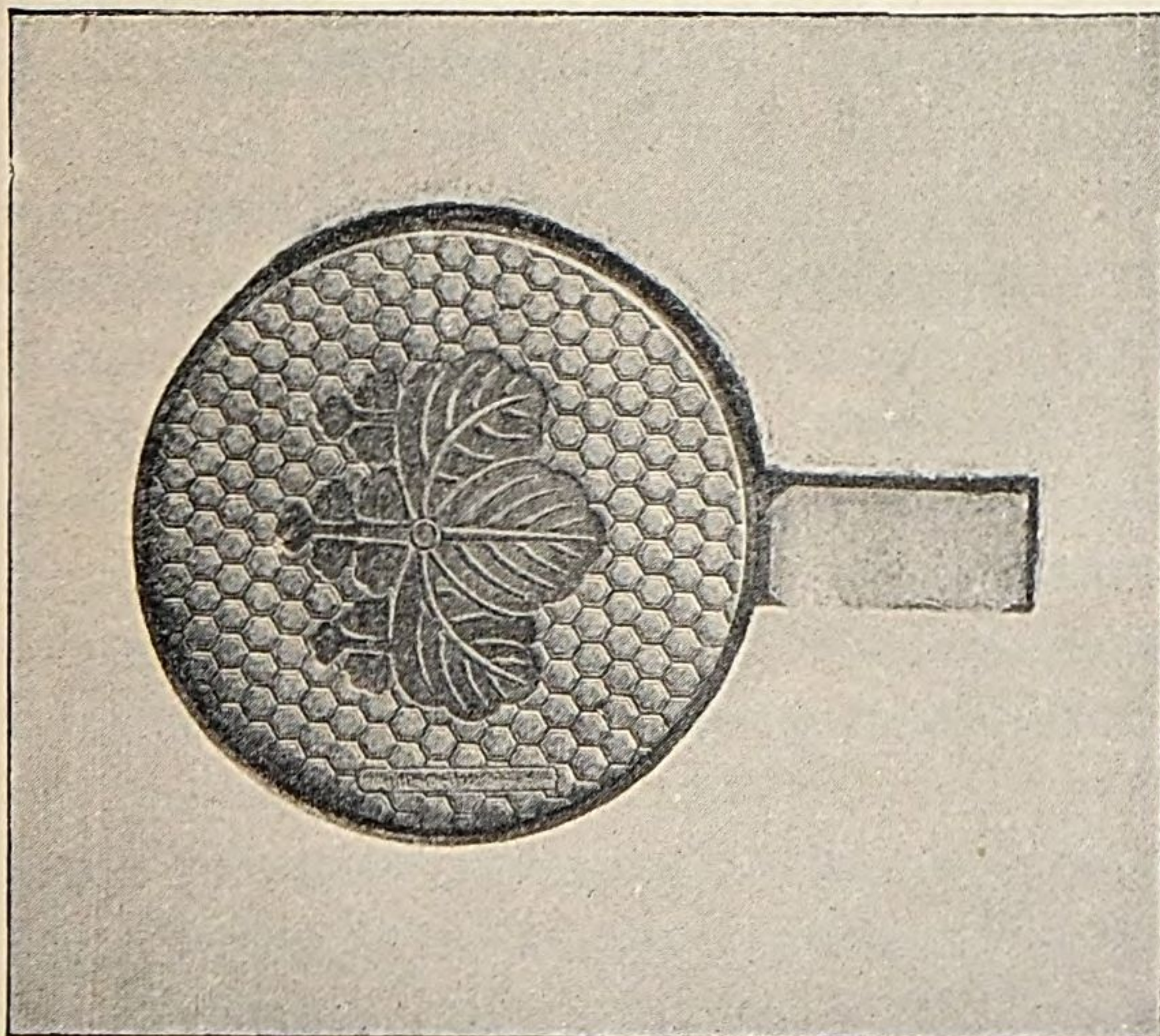


Fig. 35.

Jetzt nehmen Sie aber einmal den Spiegel und halten Sie ihn in das Licht der Sonne oder in die Strahlen der elektrischen Bogenlampe und lassen einen Lichtstrahl von ihm auf jene weisse Fläche oder auf jenen Schirm reflectiren. Was sehen Sie jetzt? Warum sehen Sie, während der Lichtstrahl auf der vorderen Seite gespiegelt wird, das auf der Rückseite befindliche Muster (Fig. 36)? Das ist

eben jene ausserordentliche „magische“ Eigenschaft, welche diese Spiegel berühmt gemacht hat.

Ein anderer Spiegel hat auf der Rückseite einen Kreis in Hochrelief mit einem feurigen um denselben herum kriechenden Drachen in Niederrelief. Die Vorderfläche ist herrlich polirt und zeigt keine Spuren des Musters auf der Hinterfläche. In den Gang der Lichtstrahlen der Bogenlampe gebracht, entwickelt er einen Lichtfleck auf der Wand, innerhalb dessen der Kreis mit grosser Helligkeit auftritt, während der Drache unsichtbar ist. Und so ist es stets: die Theile in Hochrelief erzeugen diesen „magischen“ Effect, während diejenigen in Niederrelief keinen Effect hervorbringen.

Viele Jahre hindurch glaubte man, dass diese Spiegel mit Hülfe eines Trics oder Kniffs hergestellt wären.

Da wurde durch Professor Ayrton in Japan jene ausserordentliche Thatsache aufgedeckt, dass die Japaner selbst keine Ahnung von der magischen Eigenschaft ihrer Spiegel hatten. Letztere entspringt thatsächlich einem Zufall bei der Herstellungsweise. Nicht alle japanischen Spiegel zeigen diese Eigenthümlichkeit. Diejenigen welche sie am besten zeigen, sind im allgemeinen dünn und besitzen eine schwach gekrümmte erhabene Vorderfläche. Es wurde durch Professor Ayrton gezeigt, und seitdem habe ich einige andere Beweise erbracht, dass die Wirkung äusserst geringen Ungleichmässigkeiten¹⁾ in der Krümmung der Oberfläche zuzuschreiben ist. Diese entstehen zufällig beim Poliren. Die Spiegel werden in Formen gegossen. Um die Fläche zu poliren, werden die Spiegel auf ihre Rückseite gelegt und von Arbeitern unter Anwendung grosser Kraft heftig mit einem plumpen eisernen Werkzeug bearbeitet. Fig. 37 ist einem japanischen Druck im Britischen Museum entnommen. Während des Processes erhalten die Spiegel eine leichte convexe

1) Diese Differenz in der Krümmung der Oberfläche kann erwiesen werden:

1. durch wirkliche Messungen, in einigen Fällen mittels des Sphaerometers;
2. indem man eine Convexlinse davor bringt, um die allgemeine Krümmung des Spiegels zu corrigiren, und dann direct in ähnlicher Weise beobachtet, wie man bei der Foucault'schen Methode die Ebenheit von Spiegeln prüft;
3. durch Reflexion einer ganzen Anzahl feiner paralleler Linien, welche in dem Bilde verzerrt erscheinen, falls der Spiegel Krümmungsverschiedenheiten aufweist;
4. indem man einen Abdruck in Guttapercha nimmt und auf electrolytischem Wege die polirte Oberfläche reproducirt und sie dann versilbert. Der versilberte Abdruck wirkt in einigen Fällen ebenso wie der magische Spiegel.

Oberfläche. Die Politur wird vervollkommenet durch Schleifen mittels Holzkohle und Abreiben mittels Papiers; hierauf werden sie „versilbert“, indem sie mit einem Amalgam aus Zinn und Quecksilber behandelt werden.

Während des heftigen Reibens mit dem eisernen Werkzeug biegt sich nun der Spiegel, wobei natürlich die dünneren Stellen dem Druck mehr nachgeben als die dickeren. Hierdurch werden die dickeren Stellen etwas mehr abgerieben als die dünneren und bleiben relativ concav oder mindestens weniger convex.

Dass wirklich kleine Verschiedenheiten der Krümmungen sich bemerkbar machen dadurch, dass sie den reflectirten Wellen Converganz oder Divergenz aufdrücken, will ich Ihnen mit Hilfe eines Glasspiegels zeigen, welcher auf seiner ebenen Fläche versilbert, auf dessen hinterer Fläche aber ein Stern eingravirt worden ist. Ich brauche nur gegen die Rückwand zu blasen und dadurch den Spiegel unmerklich zu biegen, und sogleich wird der Stern im Lichtfleck sichtbar, welchen die am Spiegel reflectirten Strahlen auf dem Schirm entwerfen. Hier werden die dünneren Stellen mehr durchgebogen, als die dicken.



Fig. 37.

Aehnliches tritt ein, wenn man ein Stück Spiegelglas local erwärmt, indem man auf seine Oberfläche eine erwärmte Geldmünze drückt; dann dehnt sich der Spiegel an der erhitzten Stelle aus und in dem am Spiegel reflectirten Licht zeichnet sich das Muster ab, mit welchem die Geldmünze versehen ist.

Schliesslich möchte ich Ihnen einige magische Spiegel zeigen, welche Herr Kearton, ein früherer Schüler von mir, gefertigt hat — wir wollen sie englische magische Spiegel nennen. Dieselben tragen weder auf der vorderen noch auf der hinteren Seite irgend welche Muster und dennoch zeigen sie Bilder in dem von ihnen gespiegelten Licht. Hier ist ein Spiegel, der eine Schlange zeigt, hier ein anderer mit einer Spinne in einem Spinngewebe, hier wieder ein anderer mit einem Mann, welcher das Horn bläst. Sie alle sind dadurch hergestellt, dass man die Figur kaum sichtbar auf dem Metallspiegel mittels Säure einätzte (drei Secunden der Einwirkung sind

genug) und dann das eingätzte Muster wieder fortpolirte. Nach einer Politur von 20 Minuten ist das Muster für's Auge vollständig verschwunden und nicht mehr zu sehen. Aber Sie können noch eine Stunde länger poliren und dennoch genügen die noch übrig bleibenden winzigen Krümmungsdifferenzen (obgleich andererseits nicht nachweisbar), um ein „magisches“ Bild im reflectirten Lichte zu erzeugen. Trotz ihrer ausserordentlichen Kleinheit drücken diese Krümmungsverschiedenheiten der Spiegeloberfläche ihre Form der Wellenfläche des Lichtes auf und ändern den Grad der Convergenz und Divergenz der reflectirten Strahlenbüschel.

Zweite Vorlesung.

Das sichtbare Spectrum und das Auge.

Farben und Wellenlängen. Regenbogenfarben. Das sichtbare Spectrum. Das durch Prismen erzeugte Spectrum. Das durch Gitter erzeugte Spectrum. Zusammensetzung des weissen Lichtes. Experimente über Farbmischung. Farben - Analyse. Blau und Gelb giebt Weiss, nicht Grün. Complementär - Farben. Contrastfarben hervorgerufen durch Müdigkeit des Auges. Wirkungen in Folge der Dauer eines Lichteindrucks. Zootrop. Animatograph.

Die Wellenlängen der vorkommenden Lichtstrahlen sind nicht alle von gleicher Grösse. Der Unterschied in der Grösse macht sich unserem Auge von selbst als Farbe bemerkbar. Gerade wie die Schallwellen von verschiedener Länge in unserem Ohre Töne von verschiedener Höhe erzeugen, ebenso bringen die Lichtwellen je nach ihrer Länge verschiedene Farbenempfindungen hervor. Jede einfache Lichtart — ich spreche hier nicht von Mischungen — kann in zweierlei Weise definirt werden; erstens durch die Farbenempfindungen, welche sie im Auge weckt, und zweitens durch die ihr eigenthümliche Wellenlänge beziehentlich Anzahl der Schwingungen. Die Wellenlänge einer besonderen Lichtart zu messen, ist freilich keine leichte Aufgabe, aber einmal bestimmt, ist die Grösse derselben eine sehr genaue Definition der betreffenden Lichtart.

In der folgenden Tabelle habe ich die verschiedenen Lichtarten, welche das Auge unterscheiden kann, ihrer Wellenlänge nach geordnet.

Tabelle I. Farben des Spectrums.

Namen der Farbe	Wellenlänge in Milliontel Millimeter ($\mu\mu$)
Aeusserstes Roth	810
Roth	680
Orange	615
Gelb	559
Grün	512
Blaugrün (Cyan)	475
Blau	449
Violett	400
Aeusserstes Violett	360

Sie sehen, dass die rothen Wellen etwa 680 Milliontel eines Millimeters betragen, während die violetten Wellen etwas grösser sind als die Hälfte der rothen, nämlich 360 Milliontel Millimeter. Die Wellenlängen aller anderen einfachen Farben liegen zwischen diesen.

Beachten Sie die Namen der Farben. Sie finden in der Tabelle weder Weiss noch Schwarz, denn Weiss ist, wie ich Ihnen bald zeigen werde, eine Mischung aller der genannten einfachen Farben, während Schwarz einfach die Abwesenheit von Licht, d. h. vollständige Dunkelheit bedeutet.

Diese Farbenskala kann natürlich in gleicher Reihenfolge auf sehr verschiedene Weise hergestellt werden. Die einfachste Art ist die, dass man ein weisses Licht nimmt, welches alle jene Farben zusammengemischt enthält, und sie daraus sondert. Aber wie? Das ist es gerade, was ich Ihnen recht klar machen möchte. In der Natur finden wir die einzelnen Farben gesondert an einander gereiht im Regenbogen vor. Können wir einen künstlichen Regenbogen erzeugen? Wie entsteht ein Regenbogen? Indem sich das Lächeln des Himmels mit den Thränen der Erde mischt, wenn wir den Poeten Glauben schenken.¹⁾ Aus Sonnenlicht und Regentropfen — (stimmt es nicht?) — welche das Licht brechen und hierdurch das Sonnenlicht in die verschiedenen Lichtarten sondern und sie in die richtige Reihenfolge ordnen. Vielleicht ist diese Beschreibung von der Entstehung des Regenbogens sehr unvollkommen, jedenfalls genügt sie aber, uns einen Fingerzeig zu entsprechenden Experimenten zu geben.

Im Innern dieser optischen Laterne befindet sich eine elektrische Bogenlampe, eine Art Miniatursonne, welche das weisse Lichtbündel liefert. Wir lassen das Licht als ein dünnes cylindrisches Bündel austreten und bringen in das Strahlenbündel — um uns eines etwas vergrösserten Regentropfens zu bedienen — diese Kugel aus Wasser, eingeschlossen in eine dünne kugelförmige Glashülle. Sie sehen den Bogen, welchen die Wasserkugel auf dem Schirm entwirft. Sie können die einzelnen Farben genau erkennen, obgleich sie nicht so brillant sind, wie diejenigen im natürlichen Regenbogen.

Aber einmal im Besitze des Schlüssels zum richtigen Experiment, lassen Sie uns einen Schritt weiter gehen. Ersetzen wir die

1) „Wir sind wie abendliche Regenbogen, welche zugleich scheinen und weinen. Erscheinungen entstanden zugleich aus gespiegelm Glanze und unseren eigenen Thränen.“ S. T. Coleridge.

Wasserkugel durch eine dreikantige Wasserflasche (Flüssigkeitsprisma). Verschwunden ist der farbige Bogen; aber statt seiner ist ein gerades Farbenband getreten, welches jetzt an einer anderen Stelle der Wand entsteht, insofern die Strahlen durch das Prisma eine plötzliche Ablenkung erfahren haben. Zwar haben wir die Bildung des Regenbogens verloren, dafür haben wir aber in der Entwicklung der Regenbogenfarben gewonnen und haben ein sehr schön gefärbtes, obgleich etwas nebelhaftes Farbenband erlangt.

Versuchen wir weiter und beobachten den Effect, welchen wir durch Variation der Flüssigkeiten erhalten. Hier ist eine dreikantige Flasche gefüllt mit Terpentinöl. Die anguläre Ablenkung des Farbenbandes ist grösser geworden, dafür aber auch die Längsausdehnung der Farbenskala. Es wird diese Wirkung verstärkt, wenn wir Terpentin durch „Zimmetöl“ ersetzen; bei Verwendung von Schwefelkohlenstoff wird das Farbenband noch brillanter, wenn auch an den Rändern etwas verwaschener.

Selbstverständlich schliesst man weiter, dass, wenn eine durchsichtige dreikantige, mit Flüssigkeit gefüllte, Flasche die Farben des Regenbogens entwickelt, auch ein dreikantiges Stück durchsichtigen Glases dieselbe Wirkung hervorbringen muss. Und so ist es auch. Folgerichtig sind wir so beim Gebrauche des wohlbekannten „Glasprismas“ angelangt, um das unter dem Namen „Spectrum“ bekannte Farbenband am vollkommensten herzustellen. Das Wort Spectrum bedeutet nichts als eine „Erscheinung“; in diesem Falle eine Erscheinung von Farben — sortirt in ihre natürliche Reihenfolge. Um auszudrücken, dass das Spectrum in diesem Falle durch ein Prisma erzeugt ist, bezeichnet man es als ein „prismatisches Spectrum“.

In allen Fällen konnten Sie beobachten, dass die Reihenfolge der Farben stets dieselbe war, so zwar, dass das violette Licht am meisten, das rothe am wenigsten abgelenkt wurde. Wäre die Brechung aller Farben die gleiche, so würde das Prisma dieselben nicht trennen können. Die Differenz zwischen der Ablenkung der am meisten gebrochenen violetten Strahlen und der am wenigsten gebrochenen rothen Strahlen bezeichnet man als „Dispersion“ des Prismas.

Wir sind jetzt bis zu dem Standpunkt der Newtonschen Versuche vorgedrungen, und wollen nun eine Verbesserung anbringen, die übrigens auch von ihm schon versucht wurde. Lassen Sie uns die Wirkung beobachten, welche eine Aenderung des Lichtbüschels hervorbringt. Bisher haben wir ein Strahlenbüschel benutzt, welches

eine runde Oeffnung passiert hatte; dasselbe beschreibt einen runden Fleck auf dem Schirm, wenn wir nichts in seinen Weg stellen. — Newton benutzte Sonnenlicht, welches durch ein rundes Loch im Fensterladen gegangen war. Wohlan, lassen Sie uns sehen, welchen Effect Oeffnungen von anderer Gestalt hervorbringen. Und weil wir einmal variiren, wollen wir gleichzeitig mittels einer Linse ein deutliches Bild der Oeffnung auf dem Schirm entwerfen, sodass wir daselbst anstatt eines verwaschenen Lichtscheins einen scharf begrenzten Fleck erhalten.

Wir beginnen mit runden Löchern von verschiedener Grösse, welche wir nach einander versuchen wollen. Hierauf bringen wir

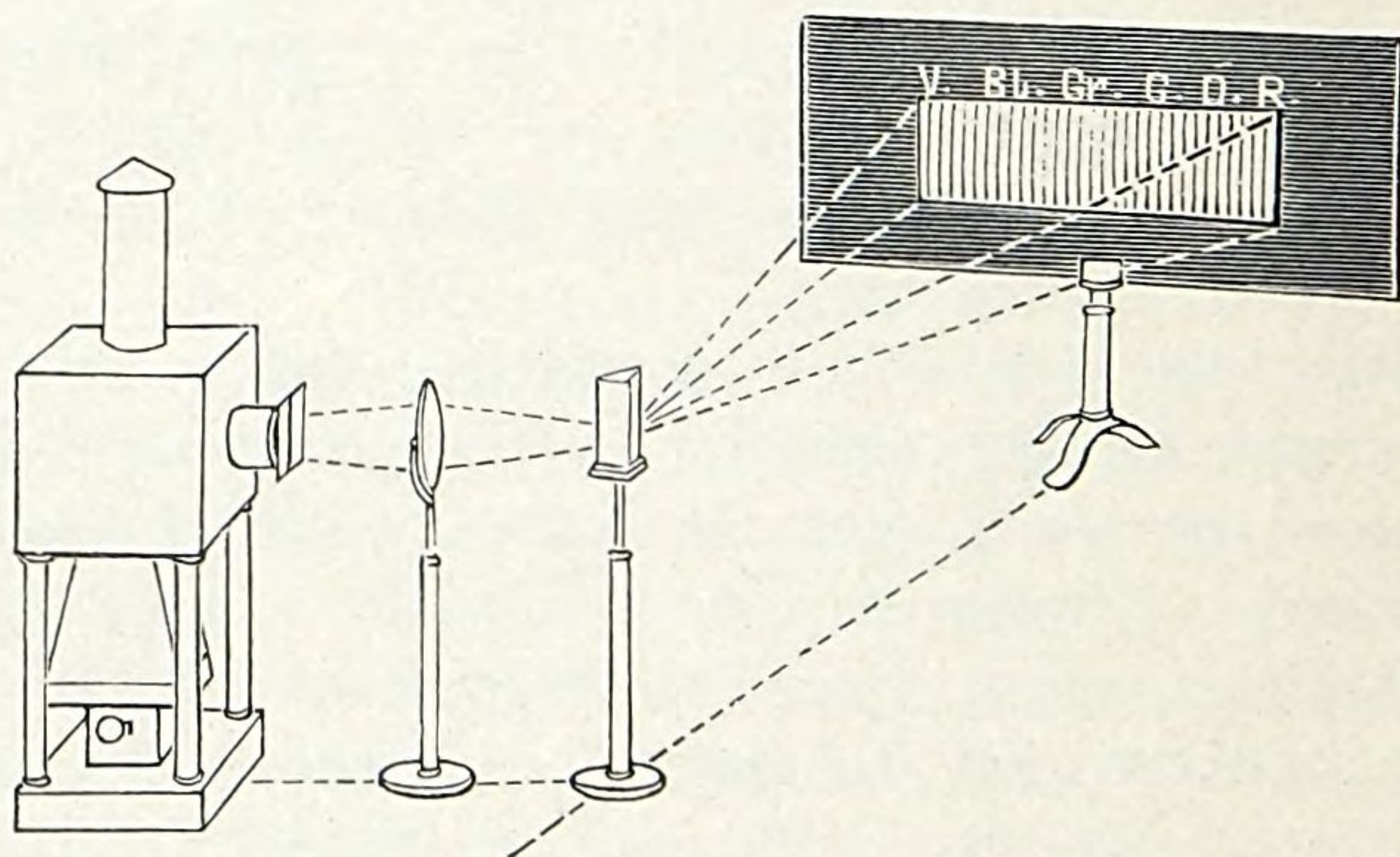


Fig. 38.

das Prisma in den Gang der Lichtstrahlen, am besten eins der bisher gebrauchten. Wir erkennen, dass sich die Farben, je grösser das Loch ist, um so mehr über einander lagern und in Folge der Mischung an Sättigung verlieren. Gebrauchen wir dagegen ein sehr enges Loch, so gewinnen die Farben trotz Abnahme der Lichtintensität bedeutend an intensiver Färbung und Glanz, eben weil sie sich jetzt weniger überdecken. Benutzen wir diesen Fingerzeig und wenden statt der runden Oeffnung eine spaltförmige Oeffnung an. Sind wie hier die Backen des Spaltes beweglich, so können wir den Spalt nach Belieben weit oder eng machen. Auch hier finden wir wieder, dass sich bei weitem Spalt die Farben überlagern und weniger rein auftreten, während sie bei engem Spalt gesättigt und intensiv gefärbt sind.

Unsere verschiedenen Experimente haben uns also zu folgender Schlussfolgerung geführt: Um ein farbenreines Spectrum zu erhalten,

muss man einen Spalt anwenden, welcher das Strahlenbüschel begrenzt, eine Linse, welche ein Bild des Spaltes als eine weisse feine Linie auf dem Schirm entwirft und ein Prisma, welches durch Brechung das Licht der Bogenlampe in seine einzelnen Bestandtheile (die verschiedenen Farben) spaltet (Fig. 38), aus denen es zusammengesetzt ist.

Vielleicht meinen Sie, dass ich unbewiesene Dinge behaupte, wenn ich dem Prisma die Fähigkeit zuschreibe, das Licht der Bogenlampe in seine einzelnen Farben zu „spalten“. Gut, ich gebe zu, dass die Redensart „es spaltet“ nicht gerade die beste ist, welche man wählen konnte; „es sondert aus“ würde ein passenderer Ausdruck sein. Aber jeder dieser Ausdrücke setzt die Annahme voraus, dass das weisse Licht eine Mischung ist, welche in einfache Bestandtheile gespalten und gesondert werden kann. Gerade diese Thatsache bewiesen zu haben ist Newton's grosse Entdeckung. Ihm gebührt das Verdienst gefunden zu haben, dass das weisse Licht, welches man bis dahin für eine einfache Farbe hielt, eine Mischung aller Farben ist. Das Prisma fügt nichts zum weissen Licht hinzu, es breitet lediglich die Bestandtheile des weissen Lichtes in der bekannten Reihenfolge zu einem Farbenfächer aus.

Mehr als hundert Jahre später kämpfte der grosse Dichter und Dramatiker Goethe — „master of those who know“ — gegen die Newtonsche Lehre und versuchte in seiner „Farbenlehre“ mit der ganzen Wucht seines Genies das Irrthümliche der Newtonschen Ansicht darzulegen. Seiner Ansicht nach breitet das Prisma die einfachen Bestandtheile des weissen Lichtes nicht bloss auseinander, sondern es nimmt das weisse Licht auf und fügt zu demselben ein Etwas, welches ihm die eine oder andere Farbe ertheilt. Aber es war vergeblich! Wie schön auch viele der Goetheschen Versuche sind, seine Lehre ging an ihrer Kraftlosigkeit zu Grunde.

Ehe wir die anderen Experimente von Newton weiter verfolgen, durch welche er dargethan hat, dass das weisse Licht zusammengesetzter Natur ist, will ich eine zweite Methode besprechen, das weisse Licht in ein Farbenspectrum zu zerlegen. In diesem Falle benutze ich kein Prisma; auch ist die Wirkung nicht hervor gebracht infolge von Brechung durch ein durchsichtiges flüssiges Medium. An Stelle dieser Hilfsmittel benutze ich ein kleines Instrument, welches ich in meiner Hand halte. Man nennt es ein „Beugungsgitter“. Es ist einfach ein polirter Spiegel aus harter Bronze (ein wenig grösser als 4 cm im Quadrat), auf dessen Ober-

fläche mit dem Diamant eine grosse Anzahl von einander parallelen und gleichweit abstehenden Strichen gezogen worden sind. Sie meinen vielleicht, man müsste das „Gitter“ einen geritzten Spiegel bezeichnen. Demgegenüber werde erwähnt, dass man die Farbenzerlegung zuerst an Gittern entdeckt hat, die aus feinen Drähten hergestellt waren. Es würde jedoch ganz unmöglich sein, ein Gitter zu fertigen, dessen Drähte auch nur annähernd so fein wären, wie die mittels Diamant erzeugten Striche auf hochpolirtem Metallspiegel. Nur mittels der Theilmaschine lassen sich feine „Gitter“ herstellen, und zwar am besten, wenn die Striche auf mechanischem Wege automatisch gezogen werden. Auf der Fläche dieses kleinen Gitters sind ungefähr 30 000 parallele Linien gezogen und keine derselben ist um ein Milliontel eines Zolles von dem ihm zugewiesenen Platz entfernt. Es ist auf Herrn Professor Rowlands Theilmaschine in Baltimore getheilt; die genaue Anzahl der Linien ist 14 400 auf je einen Zoll.

Ich stelle das Gitter so auf, dass es von dem zuvor durch einen Spalt gegangenen Licht der Bogenlampe getroffen wird, und Sie sehen das auf dem Schirm entstehende Spectrum. Dieses Spectrum ist kein „prismatisches“, da wir kein Prisma benutzt haben. Es ist ein „Beugungsspectrum.“ Beide sind von einander wohl zu unterscheiden. Wie Sie selbst sehen, ist zunächst hervorzuheben, dass das Gitter auf dem Schirm eine ganze Reihe von Spectren erzeugt. Es reflectirt nach rückwärts in mittlerer Richtung ein weisses Bild des Spaltes. Rechts und links davon erkennen wir auf jeder Seite ein helles Spectrum mit allen Farben des Regenbogens. Sodann etwas weiter von der Mitte entfernt auf jeder Seite ein noch längeres und beinahe ebenso helles Spectrum „zweiter Ordnung“; während in noch grösserem Abstände weniger helle und einander überlagernde Spectren dritter und vierter Ordnung entstehen. Wir wollen uns lediglich mit dem hellen Spectrum erster Ordnung beschäftigen. In ihm haben die Regenbogenfarben dieselbe Reihenfolge wie beim prismatischen Spectrum. Aber bemerken Sie wohl, dass jetzt das rothe Licht am meisten abgelenkt ist, während das violette Licht die kleinste Ablenkung erfahren hat. Beachten Sie weiter, dass während die Folge der Farben zwischen Roth und Violett dieselbe geblieben ist wie früher, der Abstand zwischen denselben ein anderer geworden ist. In dem prismatischen Spectrum ist Orange nahe an Roth und Gelb nahe an Orange gedrängt, während Violett und Blau beträchtlich auseinander gezogen sind. In dem Beugungsspectrum

ist weder das rothe Ende ungebührlich zusammengezogen, noch ist das Violett beträchtlich ausgebreitet.

Die Zeit erlaubt es mir nicht, die Gründe für diese Verschiedenheiten anzugeben. Es mag der Hinweis genügen, dass sie von der verschiedenen Grösse der Wellenlängen der verschiedenen Lichtarten herrühren und auf ihrer Beziehung einerseits zur Grösse der Moleküle, andererseits zum Abstand der Striche des Gitters beruhen.

Vielleicht interessirt es Sie aber zu erfahren, dass diese Eigenschaft der Beugung, welche einer mit parallelen Furchen bedeckten Oberfläche eigenthümlich ist, vom Gitter auch auf eine andere Oberfläche übertragen werden kann, indem man einfach einen Abguss des Gitters herstellt. Hier ist ein in Guttapercha gefertigter Abguss¹⁾; er ist selbst ein Gitter. Wie die ursprüngliche Bronze glitzert er in Regenbogenfarben und entwirft ebenfalls eine Reihe von Spectren auf der Wand. Perlmutter schillert gleichfalls in Regenbogenfarben und zwar aus demselben Grunde, da es von Natur eine Structur feiner Linien und Furchen besitzt, welche zur Entstehung von wenn auch nur unregelmässiger Beugung Veranlassung geben. Sind aber die Striche nicht ganz äquidistant und zu einander parallel, so sind auch die Farben nicht rein. Nehmen Sie übrigens von einem Stück Perlmutter einen Siegelack-Abdruck — schwarzer Siegelack ist am besten — so finden Sie, dass auch er glitzert wie das Perlmutterstück selbst.

Welche Methode wir aber auch anwenden um ein Spectrum hervorzubringen, die Prismen- oder die Gittermethode, stets machen wir nichts anderes, als dass wir das Lichtgemisch in seine Bestandtheile zerlegen; wir analysiren das Licht. Wir werden daher auch von diesem Zerlegungsprocess Gebrauch machen können, um die Bestandtheile zu entdecken, aus denen zusammengesetzte Farben oder sogen. Mischfarben bestehen. Vorher lassen Sie mich jedoch noch einmal zur prismatischen Methode zurückkehren, um einige weitere Experimente zu demonstrieren.

Um auf künstlichem Wege einen schön gekrümmten Regenbogen hervorzubringen, welcher den vollen Glanz der natürlichen Farben aufweist, nehme ich meine Zuflucht zu einem speciell hierfür construirten zusammengesetzten konischen Prisma. Ein aus leichtem Crown-Glas gefertigter Glaskegel (Fig. 39) ragt mit seiner Spitze in das Innere eines hohlen, abgestumpften Kegels aus Glas,

1) Ausgeführt von Herrn E. Rousseau; vergleiche die Fussnote auf S. 23.

dessen Grundfläche durch eine Glasplatte verschlossen ist. Der ringförmige hohle Raum ist mit einer starkbrechenden Flüssigkeit, z. B. Zimmetäther¹⁾ gefüllt.

Eine Platte aus Stanniol mit einem halbkreisförmigen Schlitz ist am einen Ende des Conus befestigt, worauf das ganze Prisma

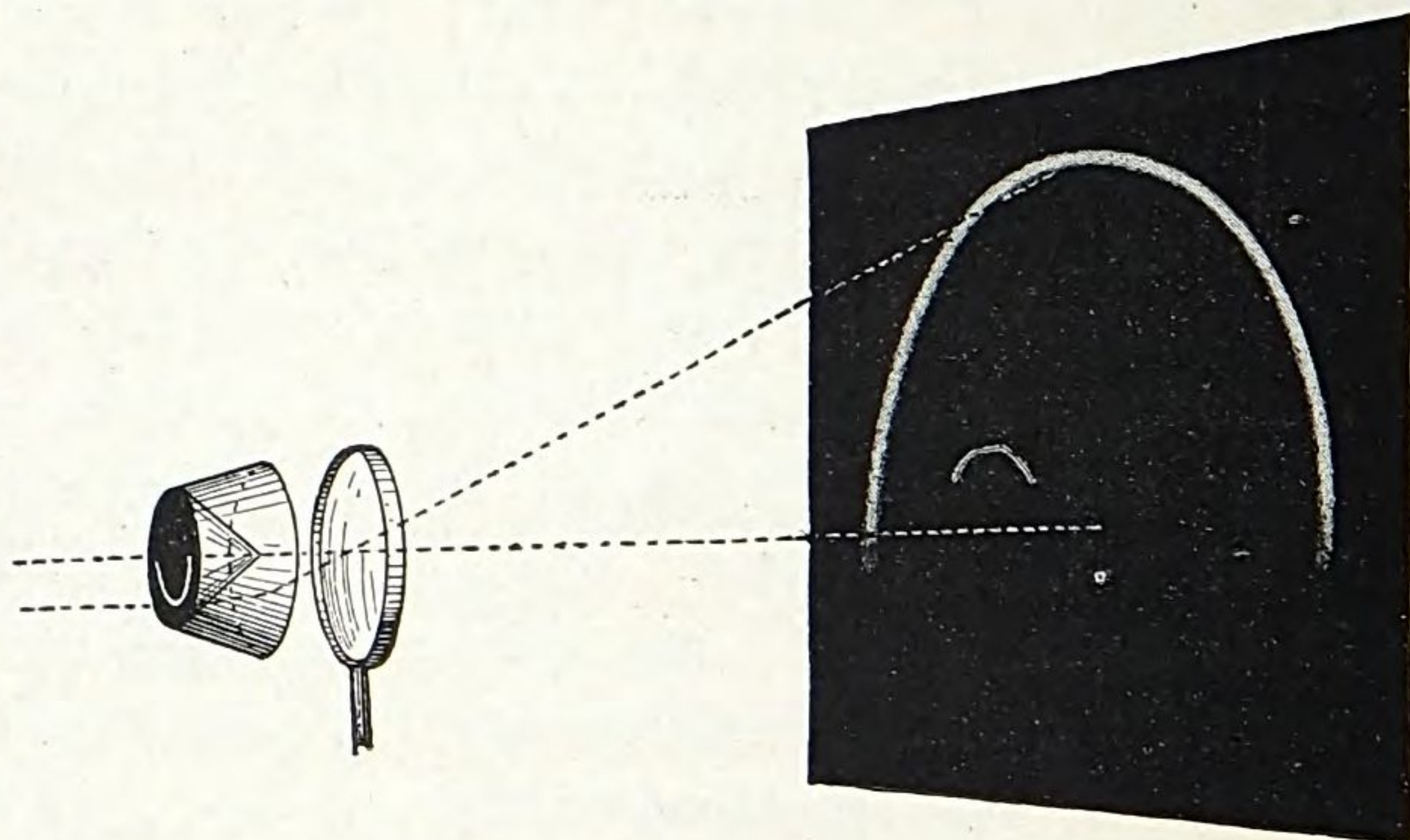


Fig. 39.

in den Gang eines nahe cylindrischen Strahlenbüschels gebracht wird. Schliesslich bedarf es noch einer Linse, um das Lichtbüschel in einem Punkte zu vereinigen.

Auf diese Weise erhalten wir auf dem weissen Schirm einen Regenbogen in fast naturgetreuen Proportionen. Beachten Sie die

1) Diese Flüssigkeit („Zimmetäther“) ist ausgezeichnet für geradsichtige Prismen zu verwenden, denn sie hat genau denselben mittleren Brechungsquotienten wie eines der leichten Jenaer Crowngläser. Die Figuren 40 und 41 zeigen die geradsichtigen Prismen mit parallelen Endflächen, welche vom Autor 1889

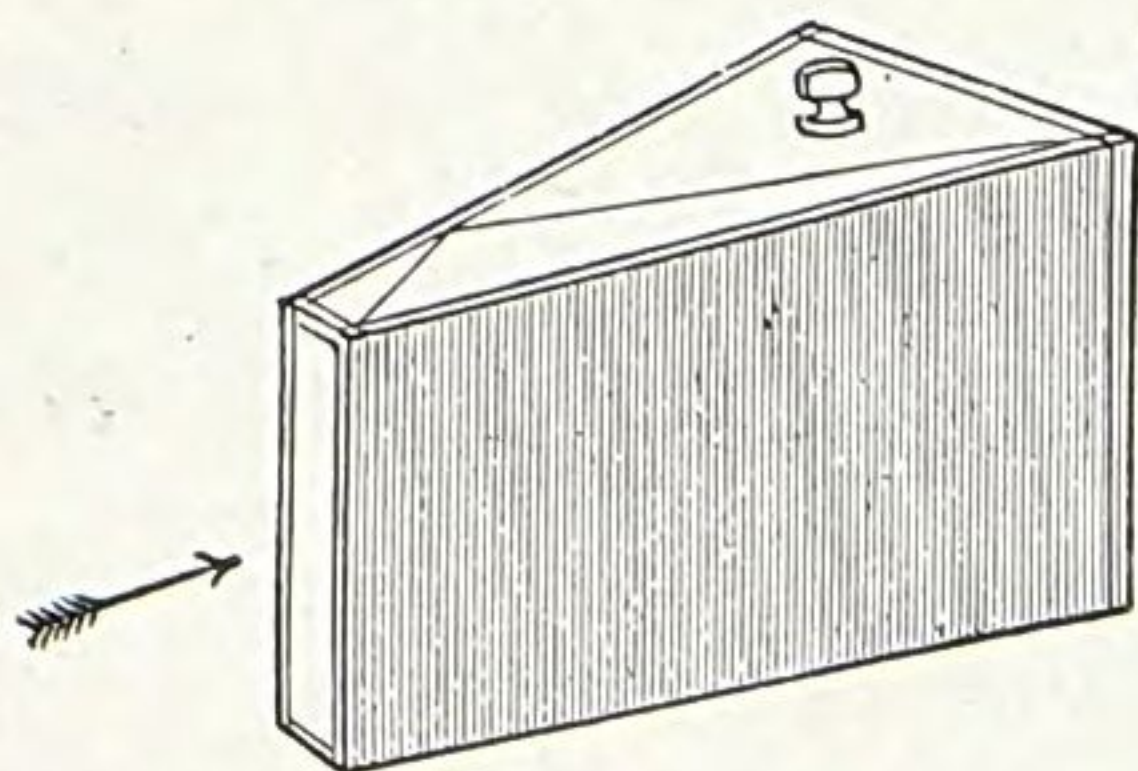


Fig. 40.

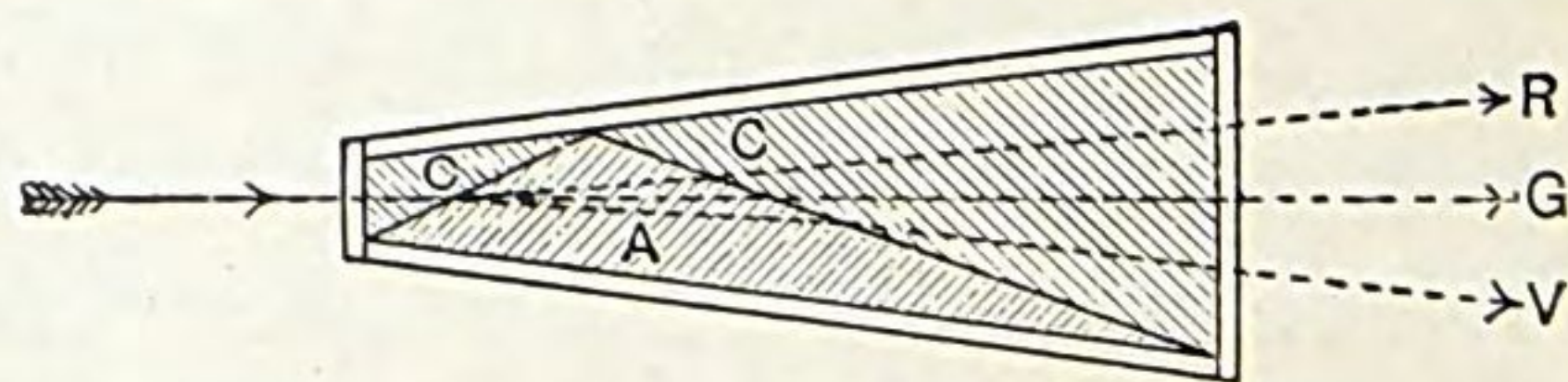


Fig. 41.

construirt und von den Herren R. und J. Beck ausgeführt wurden. Ein Prisma *A* dieses Glases vom brechenden Winkel 135° ist in einen Glastrog getaucht, welcher mit Zimmetäther *C* gefüllt ist. Wie die Fig. 41 zeigt, geht gelbes Licht *G* ungebrochen hindurch, während rothes Licht *R* nach der einen, violettes Licht *V* nach der anderen Seite abgelenkt wird. Dieses Prisma ist sehr geeignet, das Spectrum auf einen Schirm zu projiciren.

Reihenfolge der Farben, Roth am äusseren Umfang, dann Orange, Gelb, Grün, Blaugrün oder Cyan, Blau und schliesslich Violett am inneren Rande des Bogens. Das ist ganz die Reihenfolge, wie sie sich in dem natürlichen Regenbogen vorfindet. Aber Sie können ihn oft von den Malern falsch dargestellt sehen; diese setzen entweder die Farben in verkehrter Reihenfolge oder Roth an den inneren und Violett an den äusseren Rand.

Mein Assistent wird uns jetzt auf dem Schirm das helle Spectrum entwerfen, welches wir vorher gesehen haben, damit wir im Stande sind, die Wirkungen der verschiedenen Spectralfarben in Bezug auf gefärbte Stoffe zu studiren. Hier habe ich ein Stück Stoff von blauer, und hier ein Stück von scharlachrother Farbe. Welches wird die Wirkung sein, wenn wir diese Stoffe in das Spectrum halten und sie erst von der einen Lichtart und dann von der anderen beleuchten lassen? Bringen wir den blauen Stoff in den rothen oder gelben Theil des Spectrums, so erscheint er schwarz. In dem blauen Theil dagegen erscheint er blau, in dem grünen grün und in dem violetten Theil violett. Es ist klar, dass seine Oberfläche unfähig ist, Roth oder Orange oder Gelb zurückzuwerfen, während sie recht gut sowohl Grün als auch Blau und Violett wieder spiegelt. In der That absorbirt der Stoff von dem auffallenden weissen Tageslicht einige der Wellen und vernichtet dieselben, während er einige andere Wellen zu unserem Auge zurückwirft, die in demselben den Eindruck von Blau erwecken, welcher durch die grün-blauen und violetten zurückgeworfenen Strahlen modificirt wird.

Der rothe Stoff dagegen erscheint roth in den rothen Theilen des Spectrums, schwach orange und schwach gelb, wenn er dem orangefarbenen und dem gelben Licht ausgesetzt wird, während er in allen anderen Farben des Spectrums schwarz erscheint. Dieser rothe Stoff absorbirt und vernichtet also alle violetten, blauen und grünen Strahlen und reflectirt nur die näher dem rothen Ende des Spectrums gelegenen Lichtarten gut. Aber unstreitig würde er nur rothes Licht reflectiren, wenn nur rothes Licht anwesend wäre, ebenso wie der blaue Stoff nur blau erscheinen würde, wenn nur blaues Licht anwesend wäre. Daraus folgt, dass die Farbe nicht in dem Stoff steckt, sondern dadurch erzeugt wird, dass das weisse Licht vom Stoff selectiv (auswählend) reflectirt wird.

Zum Beweis dessen lassen Sie uns diese Stoffe in einem Licht betrachten, welches weder Roth, noch Blau, noch Grün, noch Violett enthält, sondern lediglich gelbe Strahlen aussendet. Dazu ent-

zünden wir eine monochromatische, d. h. einfarbige Flamme, wie sie von Professor Tyndall hier gebraucht zu werden pflegte (Fig. 42) und welche nichts anderes ist als eine Bunsenflamme, in deren Lichtkegel sich ein Natriumsalz befindet. Hierdurch entsteht eine ausserordentlich helle gelbe Flamme, welche frei ist von allen anderen Lichtarten. Ich beleuchte jetzt diese blauen und rothen Stoffe mit dem Licht der gelben Natriumflamme.

Während das blaue Zeug schwarz erscheint, macht das rothe den Eindruck von Grau. Von einer Reihe buntfarbiger Papierstreifen, welche neben einander auf einer Unterlage befestigt sind, erscheinen alle schwach grau oder schwarz, mit Ausnahme des gelben, welcher heller erscheint als alle anderen. Selbst feurig gefärbte bunte Blumen erscheinen nur schwarz oder grau, während das menschliche Antlitz Todtenblässe annimmt. —

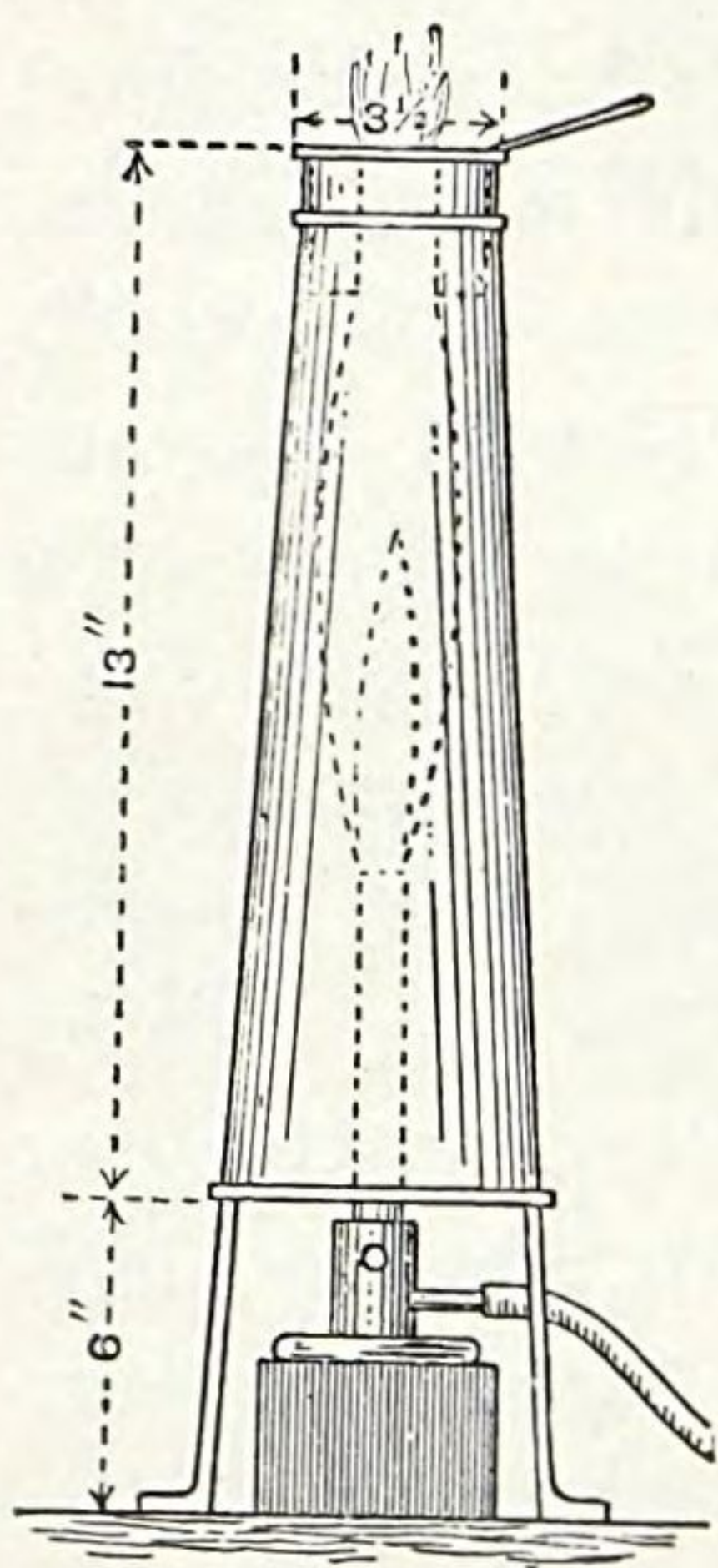


Fig. 42.

Wenn Newtons Ansicht richtig ist, dass das weisse Licht nichts anderes als eine Mischung von Lichtarten der verschiedensten Farben ist, dann muss es auch möglich sein, weisses Licht dadurch herzustellen, dass man Lichtsorten aller Farben mit einander mischt. Versuchen Sie aber nicht etwa die Pigmentfarben aus Ihrem Malkasten zu mischen — diese würden gemischt kein weisses Licht geben. Die Pigmentfarben sind eben eher „Dunkelheiten“ als „Lichter“!

Ueberlegen Sie einen Augenblick, was Sie thun, wenn Sie einen Carton carmoisinroth malen wollen. Sie nehmen ein Stück weisses Papier und bringen auf dasselbe ein Pigment, welches im Grunde genommen das Papier „verdunkelt“, so zwar, dass es zu Ihrem Auge die carmoisinrothen Strahlen sendet, während es die anderen Farben des weissen Lichtes verschluckt. Pigmentfarben dürfen Sie also keinesfalls mischen — Sie müssen „Lichter“ mischen, und zwar in ganz bestimmtem Verhältniss zu einander.

Es giebt verschiedene Arten, solche Mischungen auszuführen. Zunächst wollen wir die Spectralfarben selber benutzen und sie so combiniren, dass sie wieder Weiss geben. Dazu fangen wir das schief aus dem Prisma austretende Spectrallicht auf und reflectiren dasselbe mittels eines versilberten Spiegels auf den Schirm. Bewege ich jetzt den Spiegel schnell hin und her, so bewirke ich, dass das

Spectrum ebenfalls schnell hin und her zittert. Wie Sie sehen, vermischen sich die Farben durch die rasche Aufeinanderfolge und wir erhalten ein weisses Band, welches nur an den Rändern gefärbt erscheint, da hier nicht alle Farben zur Deckung kommen.

Eine zweite Methode, das Spectrum wieder zu vereinigen, ist folgende. Man bringt eine Cylinderlinse (Fig. 33 S. 37) so in den Gang der divergirenden farbigen Strahlen des Spectrums, dass sie dieselben auf dem Schirm wieder vereinigt; auf dem Schirm entsteht, wie Sie sehen, das Bild des Spaltes als ein weisser, schmaler Streifen.

Ein anderer von Newton herührender Versuch ist der folgende. Man trägt auf einer kreisrunden Pappscheibe (Fig. 43) die verschiedenen Farben in Gestalt enger Sectoren auf und zwar in einem durch Vorversuche ausprobirten Grössenverhältniss, welches das beste Resultat giebt. Versetzt man diese hell beleuchtete Scheibe mit Hülfe einer kleinen Rotationsmaschine in schnelle Umdrehungen, sodass die Farben im Auge sich mischen, so macht sie den Eindruck von Weiss. Ein ähnliches Arrangement kann getroffen werden, um die Laterne zu gebrauchen; in diesem Falle muss die Scheibe aus durchsichtigen, farbigen Sectoren zusammengesetzt werden.

Diese Farbenmischmethode, bei welcher man eine Scheibe vor dem Auge rotiren lässt, auf der die zu mischenden Farben aufgetragen sind, kann noch für andere Zwecke gebraucht werden. Wünschen wir z. B. Roth und Grün, oder Blau und Orange mit einander zu mischen, dann brauchen wir nur eine runde Scheibe (Fig. 44) mit diesen Farben zu bemalen, sei es in halben Kreisen oder in Quadranten oder in irgend einer anderen gewünschten Proportion, um bei der Rotation der Scheibe die Mischfarbe zu erhalten.

Die Anordnung, welche ich jetzt zeige, bietet eine Belehrung in verschiedener Hinsicht. Auf die Rotationsmaschine ist ein leichter Holzcyylinder gesetzt (Fig. 45), welcher sich nach oben verjüngt,

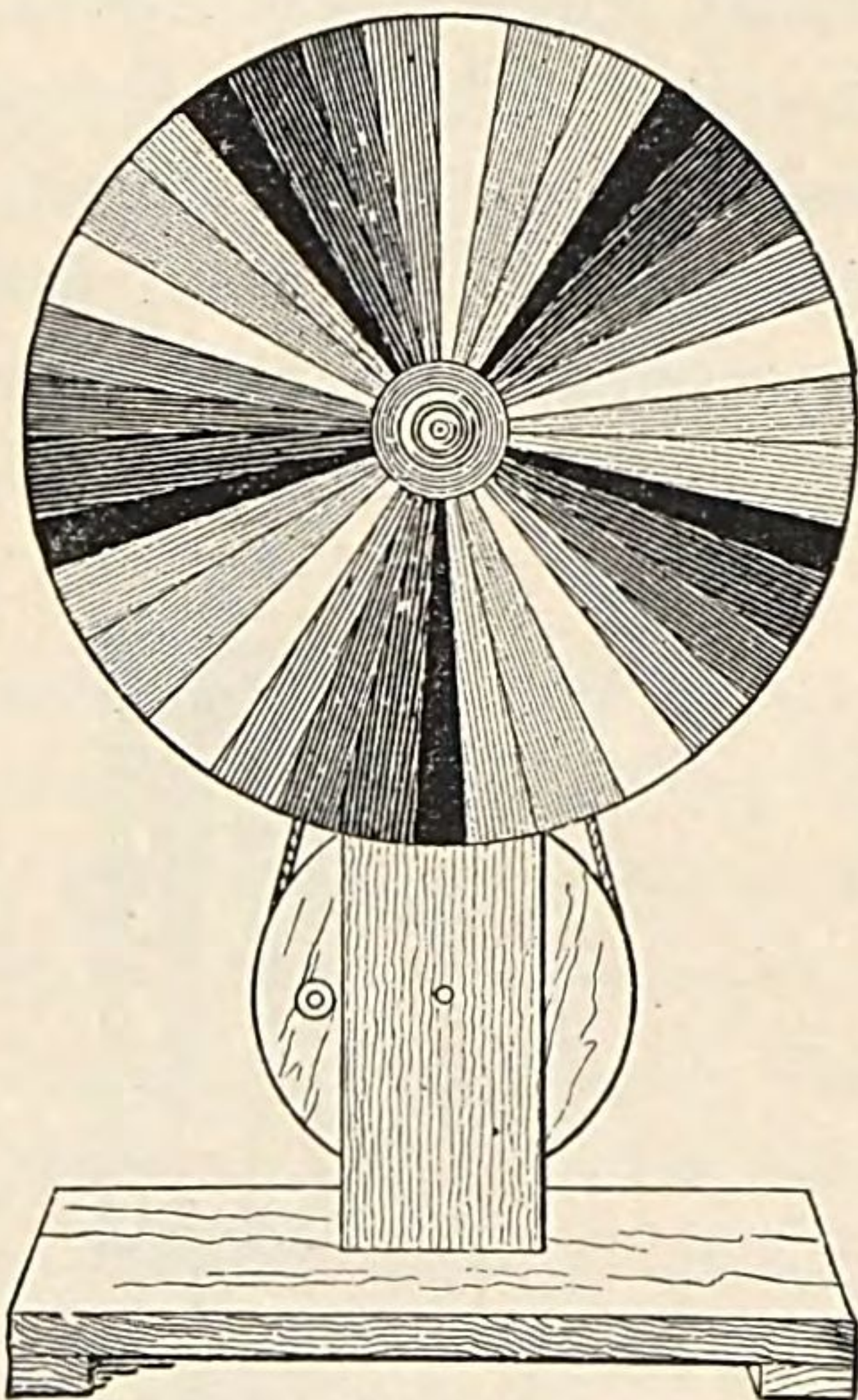


Fig. 43.

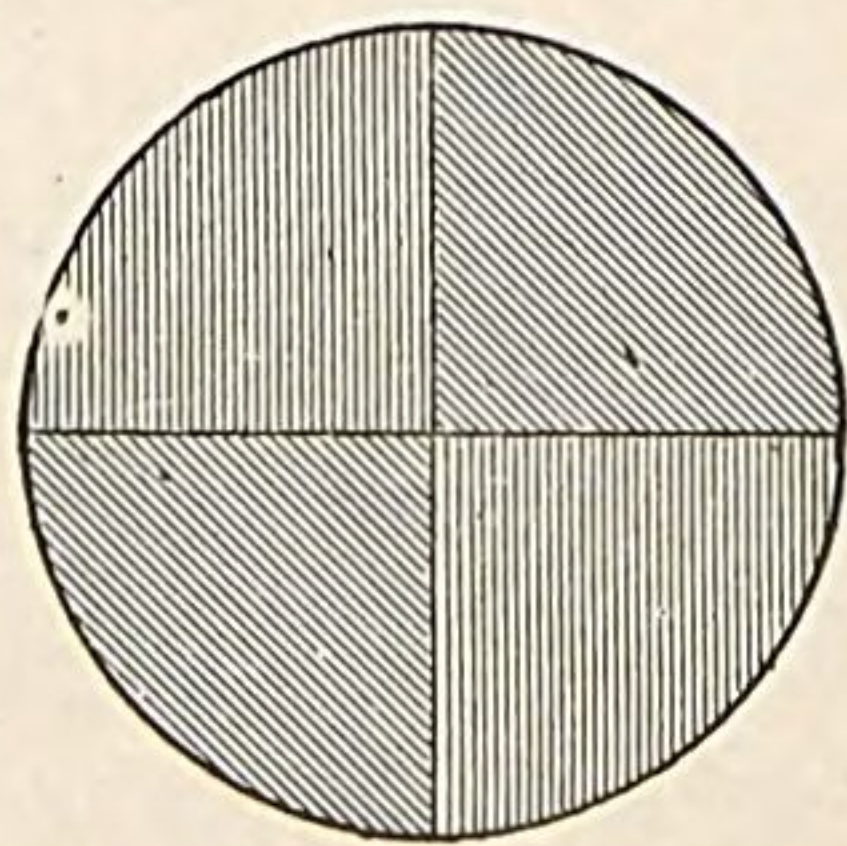


Fig. 44.

sodass man über denselben leicht eine Röhre aus Papier stülpen kann, auf welche die zu mischenden Farben aufgetragen sind. Ich habe hier mehrere solcher Röhren. Die Farben¹⁾, welche gemischt werden sollen, sind in zwei Reihen spitzer Dreiecke angeordnet, wie es die Figur zeigt. Bei schneller Rotation erhält man Combinationen in allen möglichen Proportionen. Sind z. B. Roth und Grün die beiden gewählten Farben, so ist das eine Ende der rotirenden Cylinderfläche ganz roth, das andere ganz grün, während beide Farben von unten nach oben allmählich in einander übergehen. Ungefähr in der Mitte erhält man ein merkwürdiges Grau, welches bei Tages-

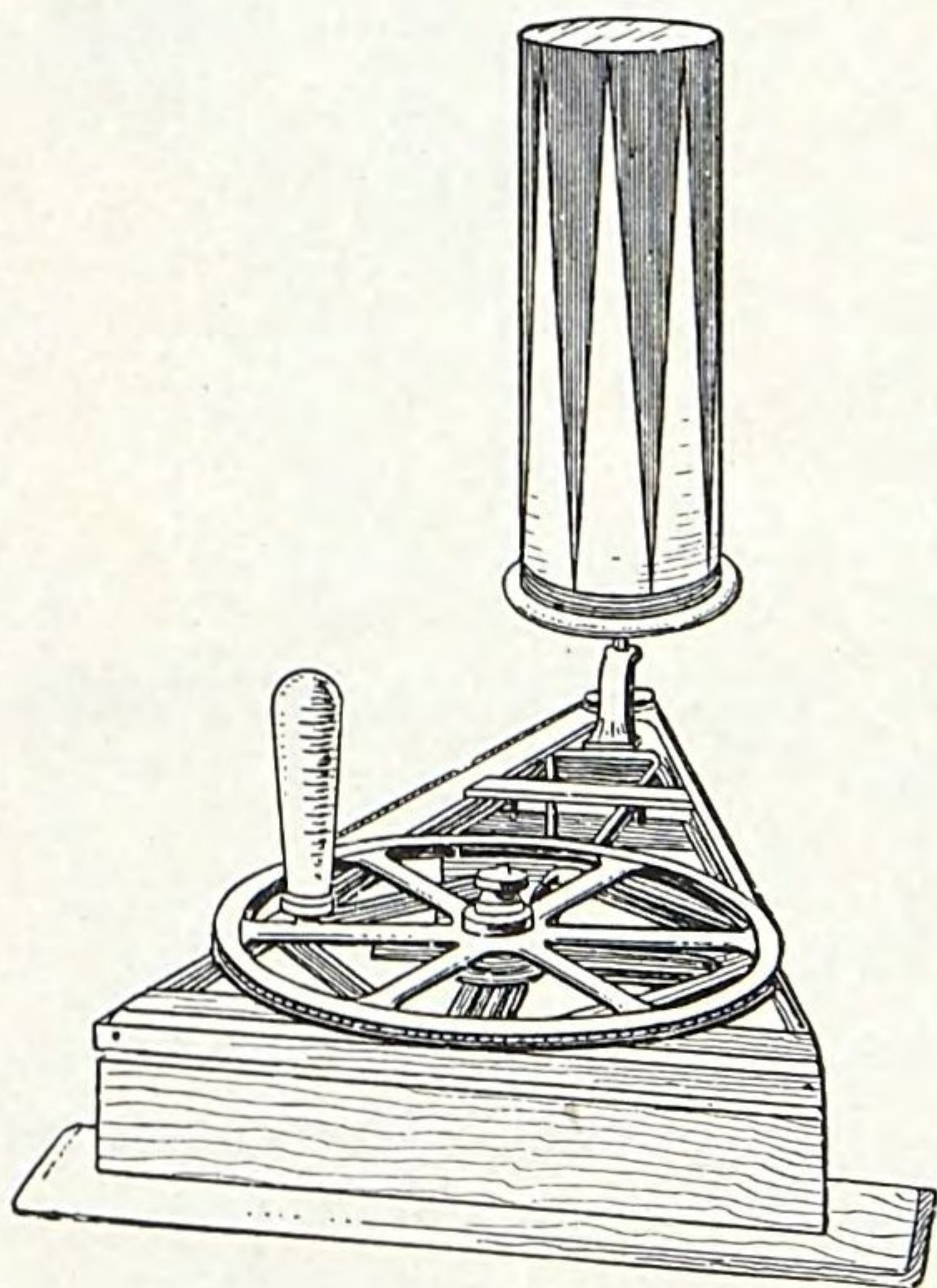


Fig. 45.

licht betrachtet eher etwas grünlich gefärbt erscheint, bei Gas- oder Lampenlicht dagegen mehr röthlich aussieht, da in diesen künstlichen Lichtquellen die rothen Strahlen vorherrschen. Dieser Wechsel der scheinbaren Färbung ist zu vergleichen mit demjenigen, welchen man bei dem seltenen Edelstein „Alexandrit“²⁾ beobachtet, der bei Tage grün und bei Nacht roth aussieht.

Ich verlasse jetzt die Experimente über die Farbenmischung und kehre zur Eigenschaft des Prismas zurück, gemischte Lichter dadurch zu analysiren, dass es deren Bestandtheile zu einem Spectrum aus-

breitet. Newton stellte ein wichtiges Experiment an, um zu zeigen, dass eine einzelne Farbe nicht weiter zerlegt werden kann, wenn man sie nochmals durch ein zweites Prisma gehen lässt. Ich bringe in den Weg der das Spectrum bildenden farbigen Strahlen eine Blende aus Pappe mit einem engen Spalt. Ich führe den Spalt längs des Spectrums, sodass er immer nur einer Farbe des Spectrums den Durchgang gestattet — jetzt z. B. dem Grün. Füge ich nun hinter dem Schlitz ein zweites Prisma in den Strahlengang ein, so wird das grüne Strahlenbüschel zwar abgelenkt, auch wird

1) Es genügen gefärbte in der geeigneten Form geschnittene Papiere.

2) Ein der Smaragdart angehörender Edelstein, welcher in einem Bergwerk Sibiriens gefunden wurde und der kaiserlich russischen Familie gehört.

seine Breite etwas vergrössert, keinesfalls aber wird dasselbe zu einem Fächer von anderen Farben entfaltet, sondern es bleibt nach wie vor Grün. Und so verhält es sich mit jeder Farbe des Spectrums. Haben Sie sich einmal eine einfache „spectrale“ oder „homogene“ Farbe verschafft, indem Sie die anderen Farben des Spectrums links und rechts abgeblendet haben, so bringt das Prisma keine weitere Farbenzerlegung hervor. Hieraus folgt nothwendig, dass jede reine Spectralfarbe eine einfache, homogene und unzerlegbare Primärfarbe und die Anzahl aller nicht mehr zerlegbaren Farben unendlich gross ist. Jede Lichtart von einer gegebenen Wellenlänge ist demnach eine einfache Farbe.

Aber das Auge hat nur drei verschiedene Farbenempfindungen, von denen jede physiologisch eine einfache Grundempfindung ist. Diese drei Grundempfindungen sind Roth, ein etwas gelbliches Grün und Blauviolett. Jede andere Farbe ausser diesen dreien erregt zugleich mehr als eine Empfindung. So löst die einfache Spectralfarbe Gelb sowohl die rothe als auch die grüne Empfindung aus. Daher kann Gelb physiologisch nicht als Grundfarbe bezeichnet werden. In derselben Weise erregt die blaugrüne Farbe sowohl die grüne als auch die blauviolette Empfindung.¹⁾

1) Anmerkung des Uebersetzers: Die Lehre von den drei Grundempfindungen wurde von Thomas Young im Anfange dieses Jahrhunderts aufgestellt und später von Helmholtz und Maxwell der Vergessenheit entrissen. Die Young-Helmholtzsche Farbentheorie nimmt wie oben erwähnt an, dass überhaupt nur drei Grundempfindungen für Farben bestehen, durch deren gesonderte oder gleichzeitige Erregung die Gesammtheit aller Farbenempfindungen verursacht wird. Gemäss ihr vermögen wir aus einer thatsächlich bestehenden Empfindung nicht die sie zusammensetzenden Empfindungen heraus zu analysiren. Die wesentlichsten Grundzüge in ihrer gegenwärtigen Gestalt sind folgende:

1. Es giebt in der Netzhaut drei Arten von photochemischen Substanzen. Zersetzung der einen erregt die Empfindung des Roth, Zersetzung der anderen die des Grün, Zersetzung der dritten die Empfindung des Blau bzw. Violett.

2. Homogenes Licht zersetzt mindestens zwei, in den meisten Fällen alle drei Substanzen. Die Rothsubstanz wird am stärksten zersetzt durch diejenigen Lichtarten, welche dem langwelligen Theile des Spectrums angehören, die Grünsubstanz durch die mittleren Theile, die Blausubstanz durch den kurzwelligen Theil des Spectrums.

Bei partieller Farbenblindheit ist die spectrale Vertheilung der Zersetzlichkeit entweder der Rothsubstanz oder der Grünsubstanz geändert, und zwar so, dass beide Substanzen in dieser Beziehung übereinstimmend geworden sind; es wird dann also stets gleichviel von der Rothsubstanz und der Grün-

Wir wollen jetzt einige Experimente über die mit Hülfe des Prismas zu bewirkende Farbenanalyse anstellen. Es gibt verschiedene wohlbekannte Farben mit wohlbekannten Namen, die gleichwohl im Spectrum der Sonne nicht enthalten sind, und zwar aus dem einfachen Grunde, weil sie zu den zusammengesetzten oder Mischfarben gehören. So giebt es im Spectrum kein Purpur, denn Purpur ist eine Mischung der beiden äussersten Farben des Spectrums, Roth und Violett. Das blasse Rosenroth, welches auch den Nelken eigenthümlich ist, existirt ebenfalls nicht im Spectrum. Ist es doch ein Roth, gemischt mit Weiss, d. h. mit einem Antheil jeder Spectralfarbe vom Roth bis zum Violett.

Röthlich Gelb, Oliv, Rothbraun, Kastanienbraun und viele andere Farben, sie alle sind zusammengesetzter Natur. Woraus sie aber auch bestehen, das Prisma vermag uns ihre Zusammensetzung anzugeben. Hier ist ein Stück Gelatine, mittels Purpur gefärbt, wie man es häufig bei Knallbonbons findet. Warum sieht dasselbe purpurn aus? Welchen Lichtarten gestattet es den Durchgang, damit es purpurn erscheint? Ich brauche es nur in den Gang der weissen Lichtstrahlen zu halten, und Sie sehen die schöne purpurne Färbung auf dem Schirm. Jetzt stelle ich das Prisma davor und sogleich wird das Purpur in seine Bestandtheile zerlegt. Sie sehen Roth an dem einen Ende, Violett und Blau

substanz zersetzt, wodurch die Empfindung Gelb entsteht, statt Roth oder Grün wie bei den Farbentüchtigen.

Die totale Farbenblindheit hat erst neuerdings (1894) A. König auf Grund der Young-Helmholtzschen Farbentheorie unter Heranziehung der Eigenschaft des Sehpurpurs zu erklären versucht.

Ausser der Young-Helmholtzschen kommt noch die Farbentheorie von E. Hering in Betracht. Nach Hering lässt sich die Mannigfaltigkeit der Gesichtsempfindungen auf sechs einfache Empfindungscomponenten zurückführen. Diese sind: Weiss, Schwarz, Urgelb, Urblau, Urroth, Urgrün, welche sich in wechselnden Verhältnissen verbinden können. Hiernach ist z. B. Grau zerlegbar in eine weisse und eine schwarze Componente, Kastanienbraun in eine gelbe, rothe und dunkelgraue (d. h. schwarze und weisse) Componente.

Es giebt keine Gesichtsempfindung, welche zugleich eine rothe und eine grüne, oder zugleich eine gelbe und eine blaue Empfindungscomponente enthält. Alle Empfindungen sind bedingt durch die chemischen Processe, welche das Leben der Sehsubstanz, d. i. der nervösen Substanz des Auges und der zugehörigen Hirntheile, ausmachen. (Näheres über die beiderlei Farbenlehren, die Young-Helmholtzsche und Heringsche Theorie siehe in Müller-Pouillet's Lehrbuch der Physik, Bd. II, 9. Auflage, herausgegeben von L. Pfaundler und O. Lummer, S. 653 ff., dem das hier Mitgetheilte fast wörtlich entnommen ist.)

am anderen Ende des Spectrums der purpurnen Farbe. Dazwischen aber, wo bei ungefärbter Gelatine Orange, Gelb, Grün und Blaugrün liegen, da ist Dunkelheit. Die Purpurfarbe in der Gelatine schneidet alle diese Farben ab und lässt nur die rothen und blauen beziehentlich violetten Strahlen passiren.

Hier habe ich ein anderes Stück Gelatine gefärbt mittels Magenta. Sie sehen, es lässt meist Roth und nur ein wenig Violett und Blau hindurchgehen. Dieser kleine Glastrog enthält eine blasse purpurne Flüssigkeit, bekannt als Condysche Flüssigkeit (Uebermangansaures Kali); bringe ich diesen in den Strahlengang, so sehen Sie, dass das Gelb und das grünliche Gelb abgeschnitten, dagegen Roth und Orange einerseits, Violett, Blau, Blaugrün und Grün andererseits hindurchgelassen wird. Hier sind einige gefärbte Flüssigkeiten in Flaschen (Fig. 46); eine rothe Flüssigkeit (Amylalcohol gefärbt mit Anilinroth) schwimmt über einer grünen Flüssigkeit (Kupferchlorid gelöst in verdünnter Salzsäure), ohne dass sich beide mit einander mischen. Die rothe ist, wie Sie mit Hülfe der spectralanalytischen Zerlegung erkennen können, ziemlich homogen und rein gefärbt, da sie alle Farben ausser Roth auslöscht. Die grüne hat ebenfalls eine gesättigte Farbe, denn sie schneidet alle Farben ausser Grün, Blaugrün und einer Spur Blau ab. Was wird geschehen, wenn ich durch Schütteln der Flasche beide Lösungen mit einander mische? Ich erhalte eine Flüssigkeit¹⁾, welche sämtliche Farben auslöscht und ein schwärzliches Aussehen annimmt. Viele andere Experimente lehrreicher Natur lassen sich mit den gefärbten Flüssigkeiten anstellen, deren scheinbare Färbung von den Lichtarten abhängt, welche von ihnen absorbirt beziehentlich durchgelassen werden. Jede Flüssigkeit, welche bloss Grün absorbirt, wird röthlich aussehen, da in dem Farbungemisch, welches sie hindurchlässt, das complementäre Roth vorherrscht. Analog wird jede Flüssigkeit oder jede Glasart, welche bloss den blauen Theil des Spectrums absorbirt, gelb aussehen. Es ist aber auch möglich, eine

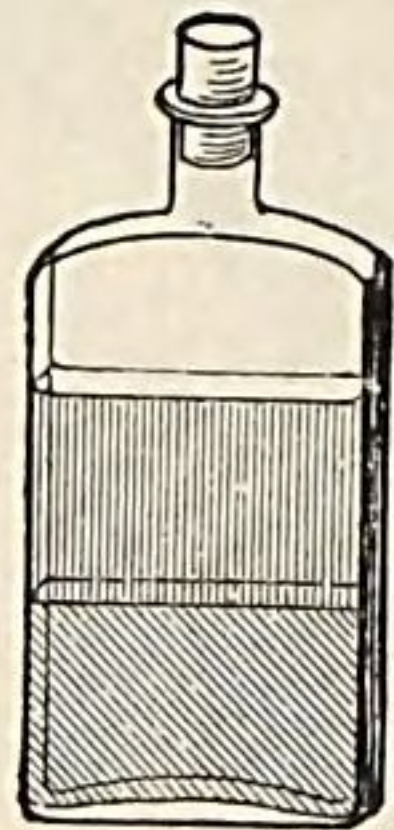


Fig. 46.

1) Die genannten Flüssigkeiten besitzen die sehr angenehme Eigenschaft, sich in ein paar Minuten wieder von einander zu trennen. Nur beim Vorbereiten bedarf es einiger Sorgfalt und Geduld, die Lösungen ins Gleichgewicht zu bringen. Man kommt am einfachsten zum Ziel, indem man erst ein wenig von der rothen Flüssigkeit nimmt, dann solange von der grünen hinzufügt, bis beim Schütteln die richtige Lichtwirkung auftritt.

Flüssigkeit¹⁾ herzustellen, die dem Auge gelb erscheint, trotzdem sie kein Gelb, sondern nur Grün und Orange hindurchlässt. Es liegt dies daran, dass diese Farben gemischt im Auge den Eindruck von Gelb hervorrufen. Dieser Versuch lehrt, dass die Empfindung Gelb, obgleich durch eine einfache Spectralfarbe von ganz bestimmter Wellenlänge hervorgerufen, auch durch eine Mischung anderer Farben erzeugt werden kann. Es ist also Gelb keine einfache Empfindung, wie Roth, Grün und Blauviolett es sind.

Dies führt mich zu der anderen Thatsache, dass, während Gelb durch die Mischung von Grün und Orange erzeugt werden kann, es keine zwei einfachen Spectralfarben gibt, welche gemischt Grün geben. Denn spectrales blaues und gelbes Licht rufen bei ihrer Mischung, wie schon oben erwähnt, nicht Grün²⁾, sondern Weiss hervor.

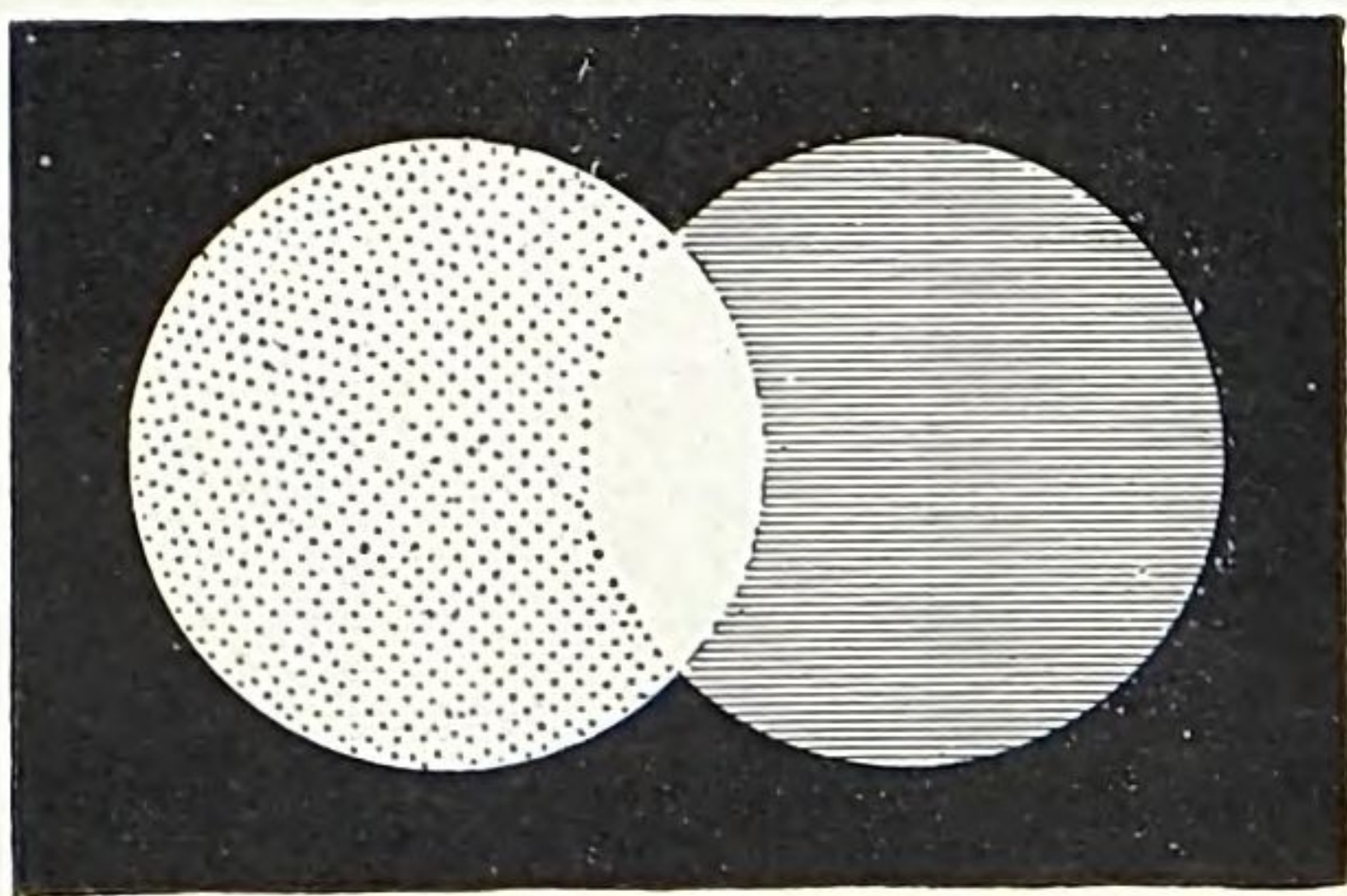


Fig. 47.

Diese, zuerst von Helmholtz aufgedeckte Thatsache, ist so wichtig, dass ich sie Ihnen durch ein Experiment fest in Ihr Gedächtniss eingraben möchte.

Sie sehen hier zwei Projectionslampen, von denen jede auf dem Schirm einen weissen, runden Fleck entwirft. Vor die eine Lampe wird ein Blatt von blauer Gelatine gehalten — der entsprechende Fleck färbt sich un-

zweifelhaft blau. Vor die andere Lampe wird ein Blatt gelber Gelatine gebracht und der zweite Lichtfleck färbt sich gelb. Jetzt wird die eine Lampe ein wenig gedreht, sodass sich beide Flecken theilweise überlagern (Fig. 47). In der That entsteht da, wo beide Kreisflächen sich decken, nicht Grün, sondern Weiss.

Ich bringe jetzt vor die eine Lampe einen farbigen Kreisel, dessen eine Hälfte aus blauer, dessen andere Hälfte aus gelber Gelatine besteht. Auch hier sehen Sie wiederum, dass beim Drehen des Kreisels infolge Mischung von Gelb und Blau nicht Grün, sondern Weiss entsteht.

1) Durch Mischung von Chromchlorid mit Kaliumbichromat.

2) Ebenso ist es unmöglich, rothes oder blau-violettes Licht durch die Mischung von zwei anderen einfachen Spectralfarben zu erhalten. Es sind eben Roth, Grün und Blauviolett die drei Grundempfindungs-Farben.

Schliesslich zeige ich noch ein Experiment, welches jeder Knabe für sich zu Hause anstellen kann. Eine Papierscheibe ist getheilt in zwölf Sectoren, von denen abwechselnd sechs mit blauem Papier und die anderen sechs mit gelbem Papier bedeckt sind (Fig. 48). Ich stecke einen Bolzen durch die Mitte, versetze die Scheibe mit meiner Hand in schnelle Rotation und wieder sehen Sie, dass Blau und Gelb gemischt Weiss geben.

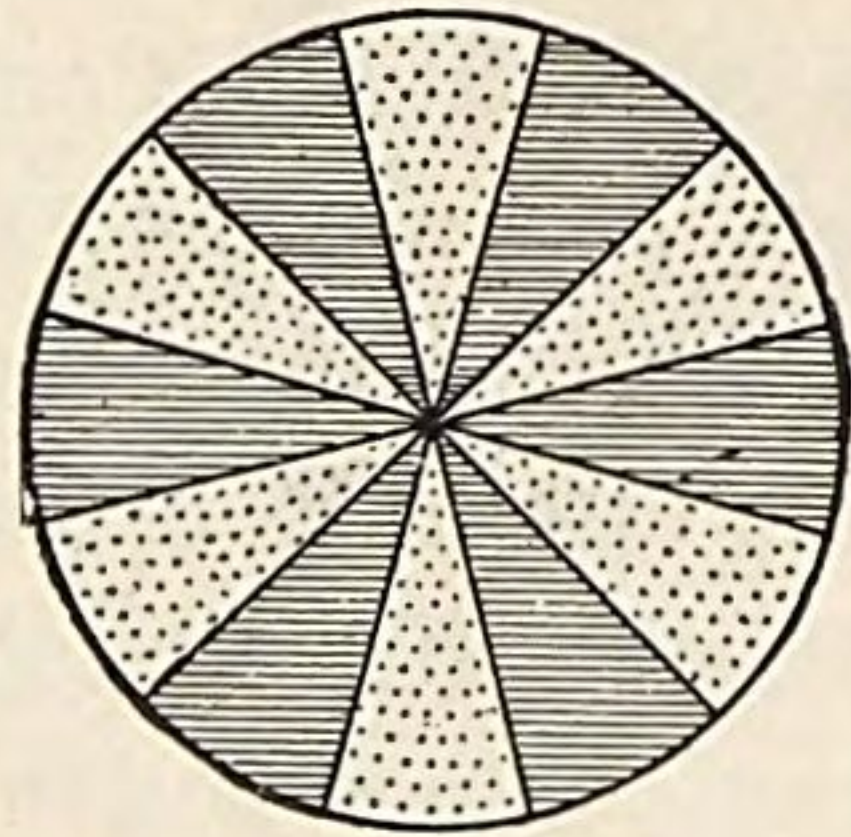


Fig. 48.

Wir nennen alle Farbenpaare, welche bei ihrer Mischung den Eindruck Weiss hervorrufen, „Complementärfarben“. Sind zwei Farben so beschaffen, dass jede gerade diejenigen Bestandtheile des Spectrums enthält, welche der anderen Farbe fehlen, dann sind sie zu einander complementär. Hier ist eine Tabelle einiger Farbenpaare, welche zu einander complementär sind.

Tabelle II. Complementärfarben.

Carmesinroth	ist	complementär	zu	Moosgrün,
Scharlach	„	„	„	Blaugrün,
Orange	„	„	„	Türkiss,
Gelb	„	„	„	Blau,
Primel-Gelb	„	„	„	Violett,
Grüngelb	„	„	„	Purpur.

Es gibt aber noch andere nicht in der Tabelle verzeichnete Farbenpaare, welche zu einander complementär sind.

Da wir jetzt wissen, dass Weiss nur entsteht, wenn im Gehirn alle drei Grundempfindungen¹⁾ Roth, Grün und Violett gleichzeitig erregt werden, so folgt nothwendig, dass, falls schon zwei Farben den Eindruck von Weiss hervorbringen, diese beiden unmöglich einfache Grundfarben sein können. Wohl kann es die eine sein, dann muss aber unbedingt die andere eine Mischfarbe zweier Grundfarben sein. Wenn primäres Roth die eine der beiden Complementärfarben ist, dann muss die andere nothwendig Blaugrün sein, welches durch Mischung aus primärem Grün und primärem Blauviolett entstanden ist.

Die Meisten von Ihnen werden sicherlich schon von den subjectiven Farben etwas gehört haben, welche man bei geschlossenem

1) Das Roth der Grundempfindung ist ein gesättigtes Roth. Das Grün der gleichen Empfindung ist ein mehr gelbliches Grün, das Violett mehr ein Blauviolett.

Auge, nachdem man in ein sehr helles Licht geblickt hat, wahrnimmt. Diese entstehen durch die Ermüdung des Sehnerven, und hängen mit der Fortdauer des Reizes auch nach Erlöschen des Lichteindrucks zusammen. Innig verwandt mit diesen Farben sind die sogenannten „Contrastfarben“, welche auf einem grauen Hintergrund gesehen werden, nachdem das Auge durch scharfe Betrachtung eines farbigen Gegenstandes ermüdet ist. Diese „Contrastfarben“ ähneln in ihrem Ton den Complementärfarben derjenigen Farben, durch welche sie ausgelöst worden sind. So erblickt man nach Betrachtung eines hellen grünen Flecks auf dem grauen Hintergrund ein Nachbild von röthlicher Färbung.

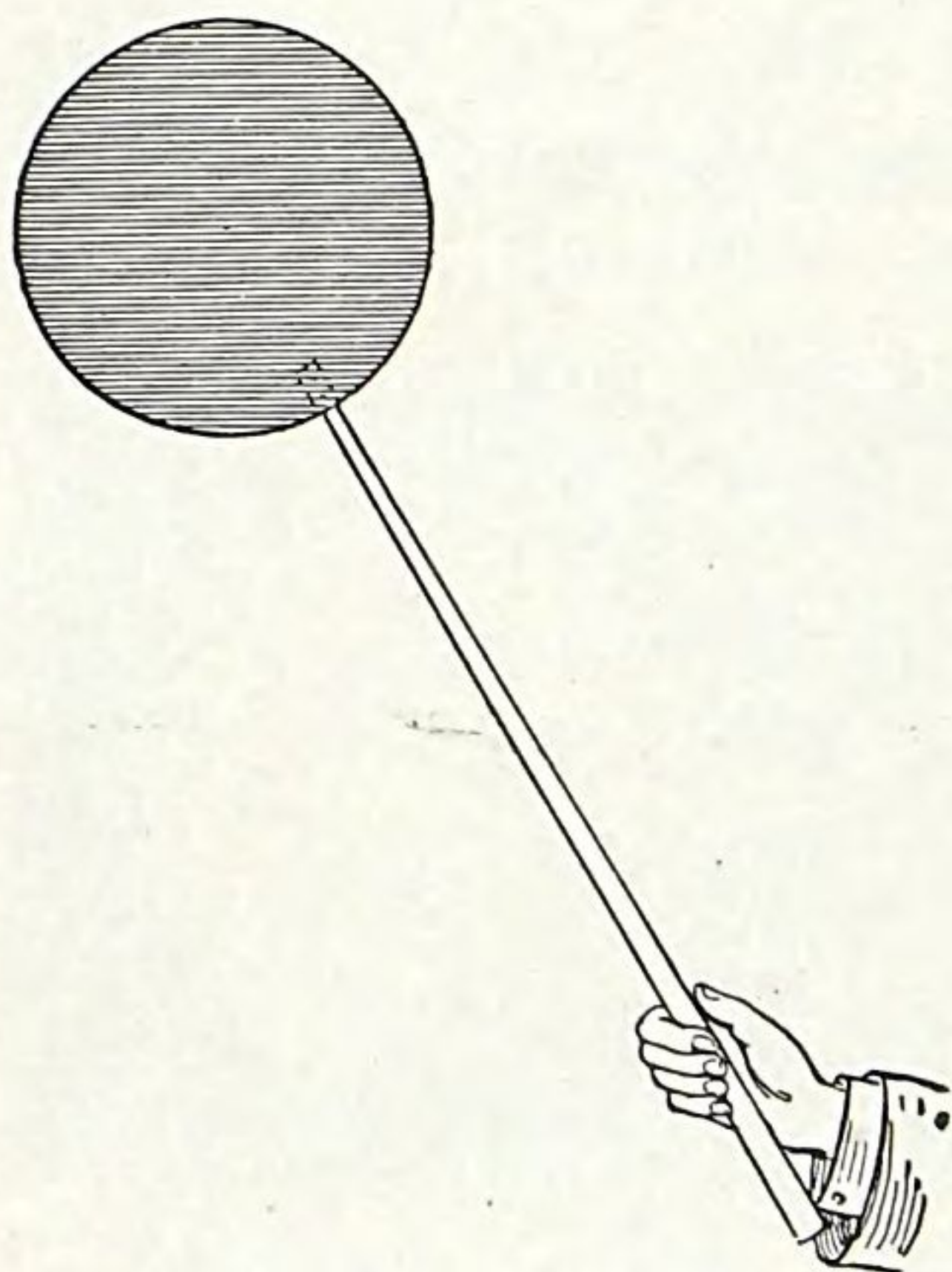


Fig. 49.

Es giebt viele Methoden, sich von der Richtigkeit dieser Regel zu überzeugen. Ich zeige Ihnen ein Experiment, welches hier in diesem Saale einst auch von Professor Tyndall vorgeführt worden ist. Ich halte vor die jetzt spärlich vom Tageslicht erleuchtete weisse Wand an dem einen Ende eines Stabes eine Pappscheibe von ungefähr 4 dm im Durchmesser, welche mit hellblauem Papier überzogen ist (Fig. 49). Die Strahlen der Bogenlampe sind auf die Scheibe gerichtet, damit ihre Farbe recht hell erscheint. Blicken Sie auf die Scheibe,

während ich mit lauter Stimme bis 30 zähle. Wenn ich bei 30 bin, ziehe ich die Scheibe weg, während Sie fortfahren, in derselben Richtung zu blicken. — Sie sehen, wenn ich jetzt die Scheibe senke, einen gelb gefärbten Fleck von derselben Grösse, da wo vorher die blaue Scheibe sich befand. In gleicher Weise würden Sie, wenn ich eine rothe Scheibe hochhalte, nach Fortnahme derselben einen grünlich gefärbten Fleck sehen. Dass Sie nach Ermüdung des Auges die Contrastfarbe erblicken, liegt einfach daran, dass die Stelle Ihrer Netzhaut, auf welche die rothen Strahlen eingewirkt haben, nachher weniger empfindlich gegen Roth ist, als gegen die anderen Farben des Spectrums. Sobald also dem Auge jetzt eine graue oder eine weisse Fläche von geringer Helligkeit dargeboten wird, muss die Netzhaut, da sie für alle anderen Farben empfindlicher ist als für Roth, von der grauen Fläche einen Eindruck empfangen, in welchem Roth geschwächt ist, d. h. aber, bei welchem Grün vorherrscht.

Eine andere Methode, die Contrastfarben zu erzeugen, ist folgende. Auf einen Ring aus Cartonpapier (Fig. 50), wird ein Blatt von durchscheinendem, gefärbten Seidenpapier gelegt und auf dieses als Hintergrund ein kleinerer Ring weissen Cartons geklebt. Dann lässt man diffuses Tageslicht auf die Vorderfläche der Scheibe fallen, sodass die weissen Ringe grau erscheinen. Wird durch dahinter gestellte Lichter das Seidenpapier aufgehellt, so sieht das Auge einen grauen Ring zwischen einem inneren und einem äusseren gefärbten Kreis. Schon nachdem Sie einige Sekunden die Scheibe angeblickt haben, wird das graue Papier mit der Complementärfarbe bedeckt erscheinen. Ist z. B. das Seidenpapier von orangener Färbung, so wird der graue Ring eine bläuliche Färbung annehmen.

Die Dauer des Lichteindrucks im Auge ist jedoch nicht auf Farben-Phänomene beschränkt. Alle gewöhnlichen Gesichtseindrücke halten eine merkbare Zeit an und die Bilder sehr hell beleuchteter Objecte verschwinden, selbst wenn sie vorher nur den tausendsten Theil einer Secunde angeblickt worden sind, erst nach $\frac{1}{10}$ Secunde im Auge. Bieten Sie also dem Auge einen zweiten Eindruck dar, ehe der erste verschwunden ist, so ist die Wirkung dieselbe, als ob sie dem Auge beide zu gleicher Zeit dargeboten hätten.

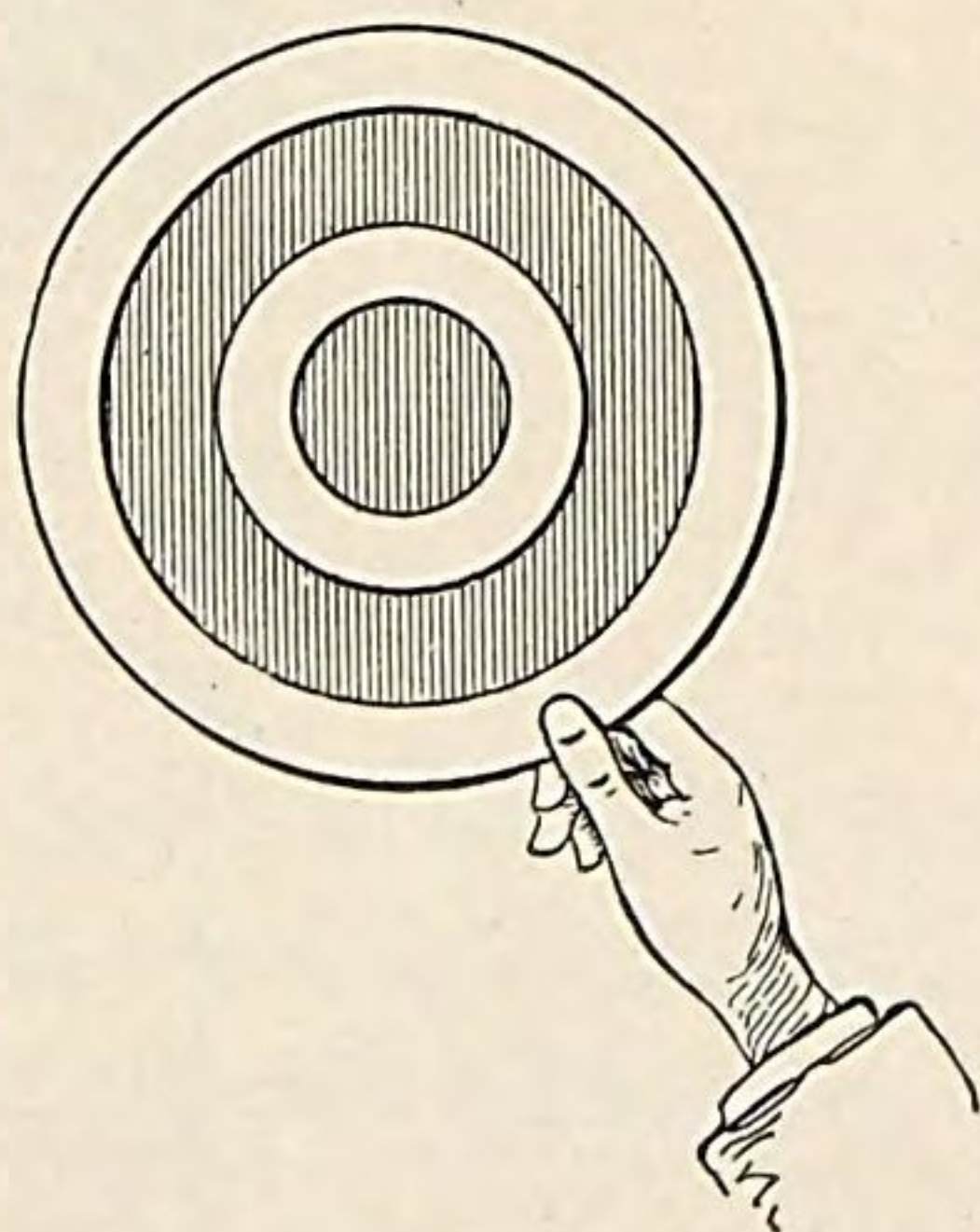


Fig. 50.

Ein einfaches Spielzeug beruht auf dieser Art; es heisst „Thaumotrop“ und besteht aus einem Stück weissen Papiers, welches, von zwei Fäden gehalten, in Oscillationen versetzt werden kann. Auf die eine Seite ist ein Pferd, auf die andere ein Reiter gezeichnet. Bläst man gegen das Blatt, sodass es hin und her schwingt, so sehen Sie den Reiter auf dem Pferd sitzen (Fig. 51 a. f. S.). Aehnlich ist folgendes Experiment: Auf der einen Seite eines verticalen Blattes ist ein Vogelkäfig (Fig. 52 a. f. S.) in seinen Umrissen gezeichnet; auf der anderen Seite ein Vogel. Mit Hülfe eines Fadens und einer Rolle versetzen wir das Blatt in schnelle Umdrehung und siehe da, es erscheint der Vogel in seinem Käfig.

Ich bringe vor die Projectionslampe ein Metallblech mit einer Anzahl von Löchern, sodass wir auf dem Schirm eine entsprechende Anzahl heller Punkte erhalten. Sobald ich das Blech in schnelle Umdrehung versetze, wird jedes kleine Loch in einen Kreis verwandelt.

Eine andere optische Täuschung, welche zur Hauptsache ebenfalls auf der Dauer des Lichteindrucks beruht, wird durch die „strobic circles“ (Fig. 53) hervorgebracht, welche ich im Jahre 1877 vorschlug. Ertheile ich diesen schwarzen und weissen Mustern eine kleine Dreh-Bewegung („rinsing“ motion), so scheinen die Kreise und gezahnten Räder um ihre Axe zu rotiren.

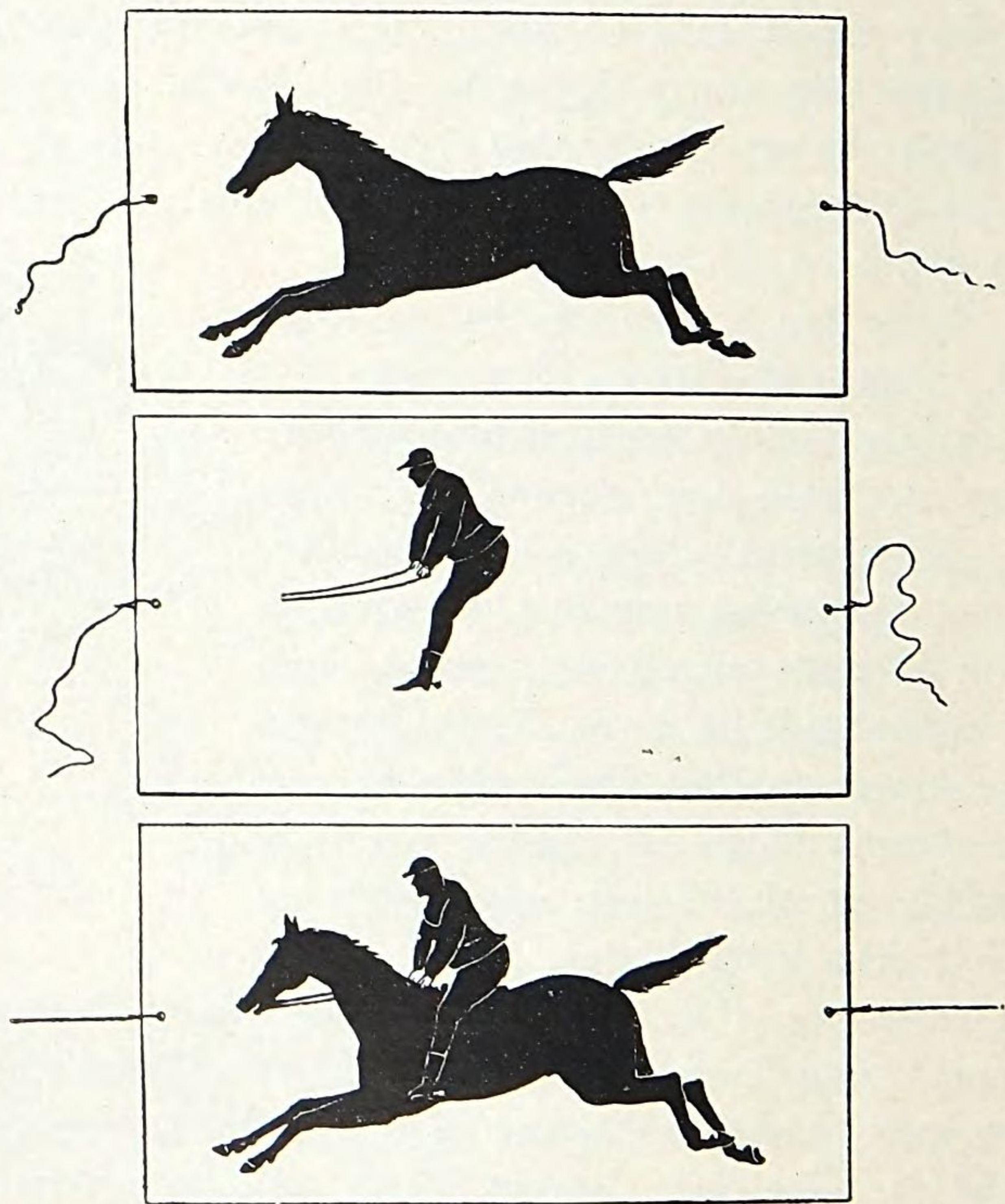


Fig. 51.

Die neueste der optischen Illusionen¹⁾, welche nicht leicht zu erklären ist, bietet Benham's Farbenkreisel.

1) Siehe in Proceedings of the Royal Society die neueste Mittheilung von Shelford Bidwell, F. R. S. Nach ihm kommt die Täuschung folgendermassen zu Stande. Wenn die besonderen, rothempfindenden Nervenfasern auf einem Theile der Netzhaut erregt sind, werden die benachbarten Nervenfasern der gleichen Gattung in etwas mit erregt, sodass ein rother Rand sich um das Bild eines plötzlich gesehenen weissen Objectes bildet. In ähnlicher Weise muss beim plötzlichen Verschwinden eines weissen Bildes eine sympathische Erregung entstehen, welche das verschwindende Bild mit einem blauen Rand erscheinen lässt.

Eine Anzahl feiner schwarzer Linien sind als Kreisbögen von verschiedener Länge auf eine weisse Kreisfläche gezeichnet, deren eine ganze Hälfte geschwärzt ist (Fig. 54). Beim Drehen dieser Scheibe, welche genügend hell erleuchtet sein muss, erscheinen

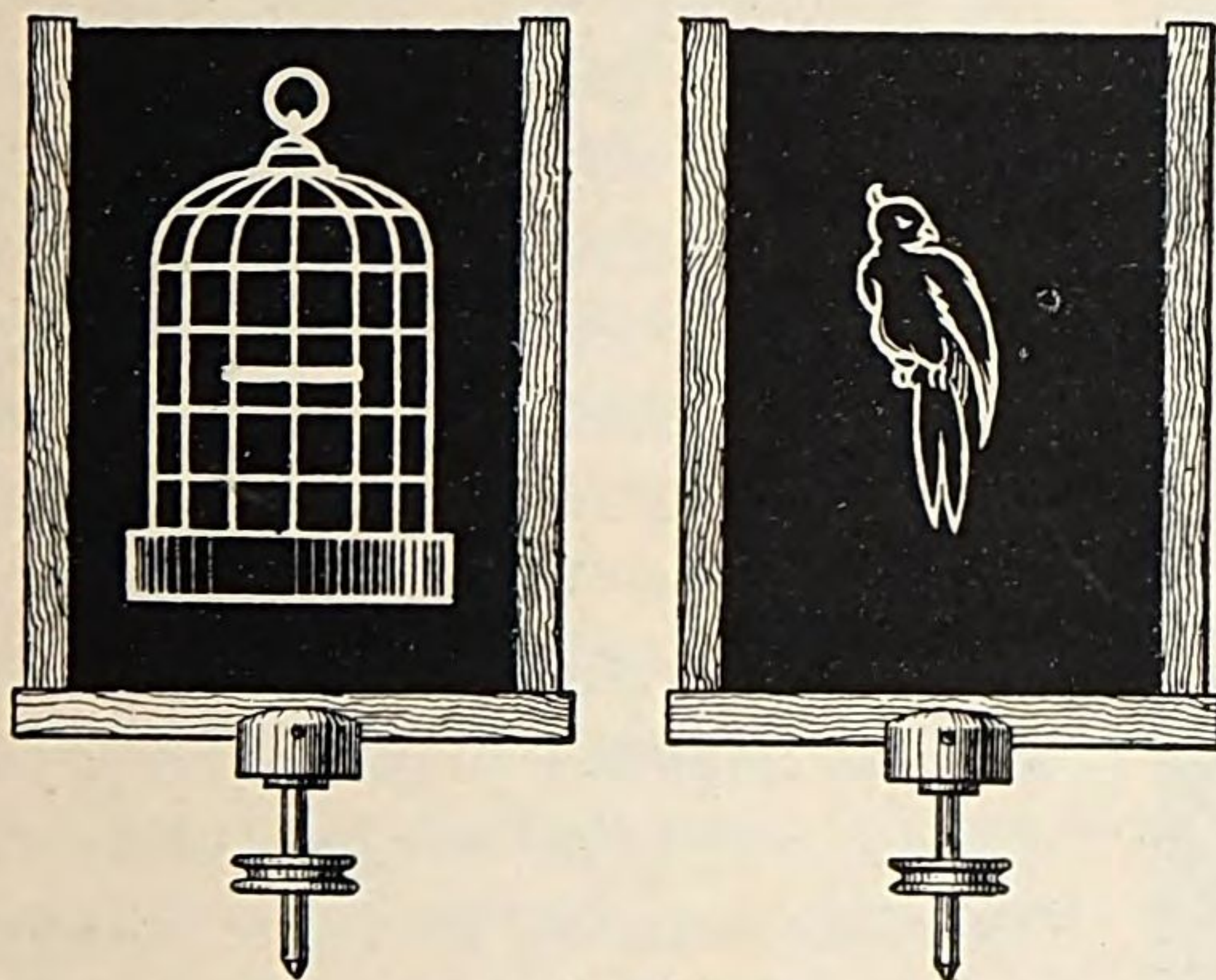


Fig. 52.

einige dieser schwarzen Kreise gefärbt. Dabei darf die Umdrehung weder zu schnell, noch zu langsam vor sich gehen. Bei umgekehrter Drehung des Kreisels kehrt sich auch die Reihenfolge der Farben um.

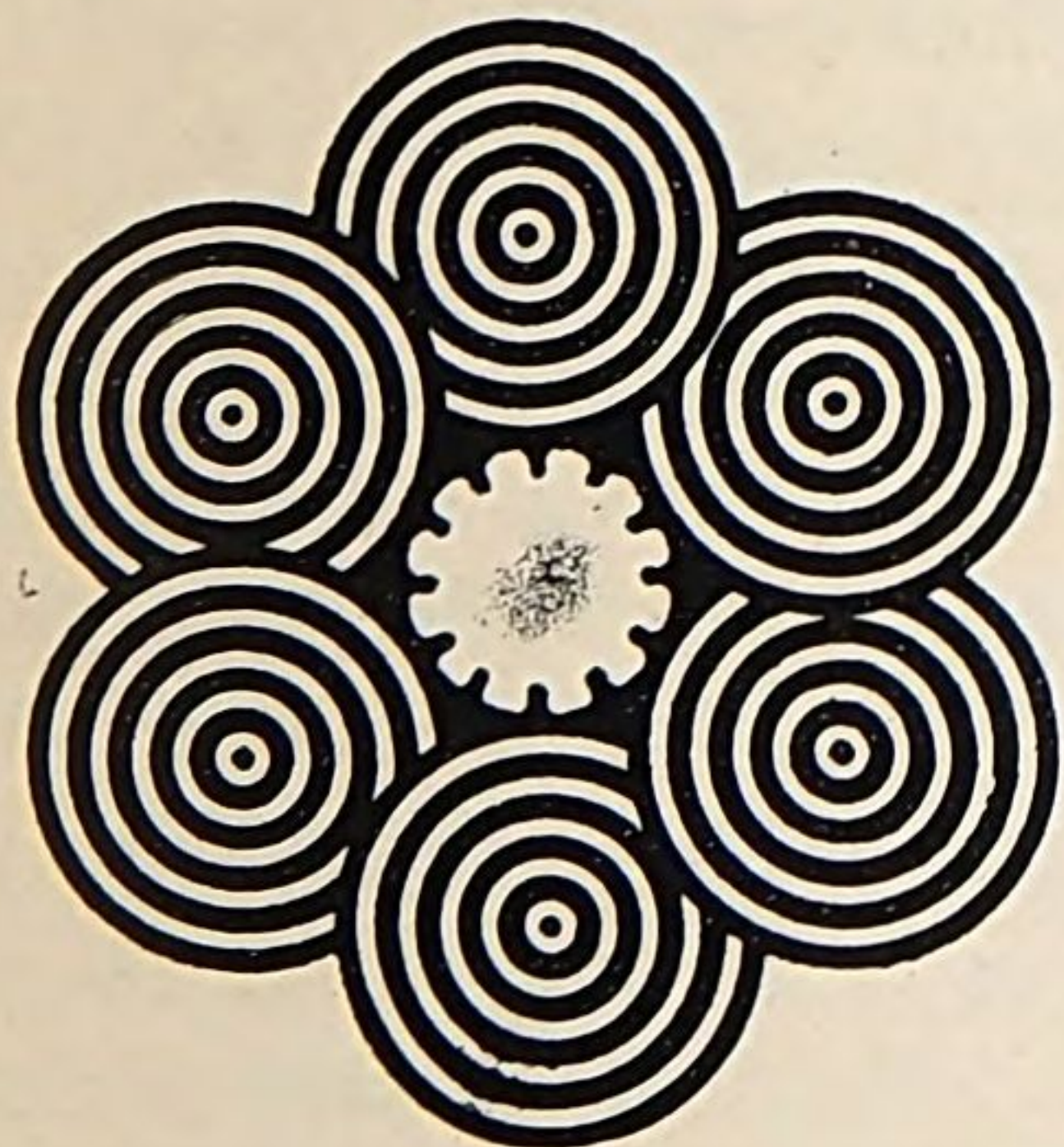


Fig. 53.

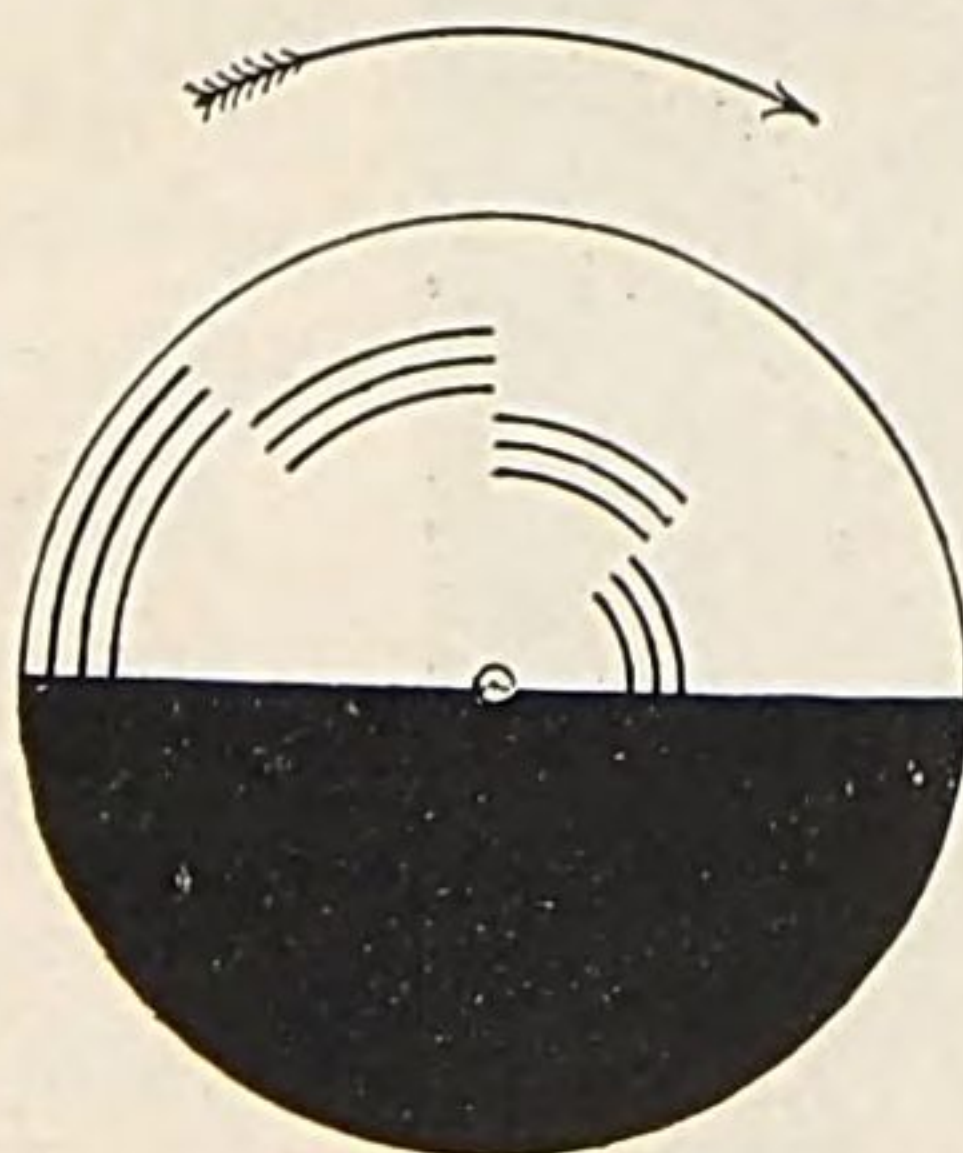


Fig. 54.

Sehr drastisch werden die Wirkungen, welche in Folge des Andauerns optischer Bilder im Auge entstehen, durch ein Ihnen längst bekanntes Spielzeug illustriert, durch das „Zootrop“ oder das Lebensrad; dasselbe giebt den Bildern einen Schein von Leben, indem es bewirkt, dass dem Auge in schneller Folge durch bewegte Spalte Bilder dargeboten werden, von denen jedes sich nur um wenig von dem Vorhergehenden unterscheidet.

Sollen z. B. die Flügel einer Windmühle in natürlicher Bewegung gesehen werden, so müssen die aufeinander folgenden Bilder die Flügel so darstellen, als hätten sie sich während des Intervalls,

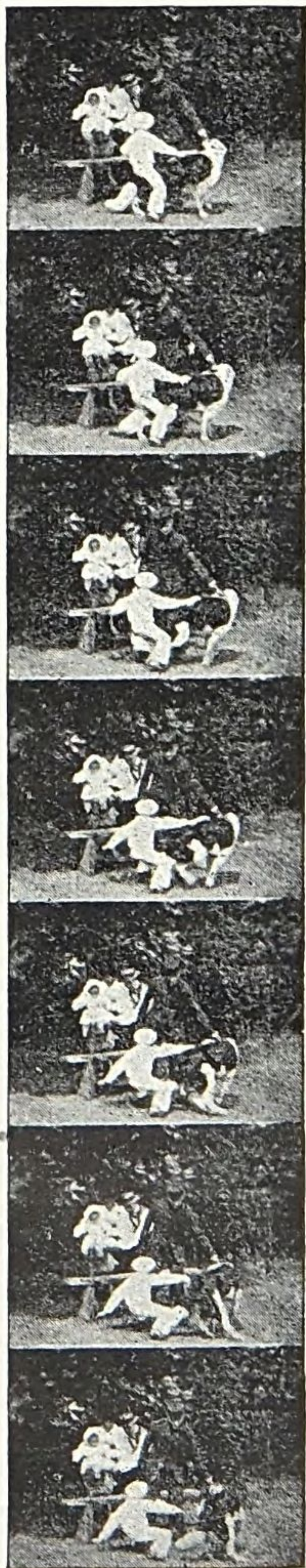


Fig. 55.

welches zwischen dem Erblicken des einen und des nächstfolgenden Bildes liegt, ein wenig gedreht. Diese Intervalle müssen freilich ein wenig kleiner sein als der zehnte Theil einer Secunde, sodass die aufeinander folgenden Bilder sich im Auge vermischen und die Bewegung zwischen jedem Bilde und dem darauf folgenden eine sehr kleine ist. Herr Muybridge hat diese Methode in geschickter Weise angewendet, um die Bewegung der Thiere zu studiren. Anschütz's lebende Bilder, welche durch intermittirende Funken beleuchtet werden, bedeuten eine weitere Vervollkommnung in dieser Richtung. Und der neueste Triumph in der Entwicklung dieses Gegenstandes ist erreicht durch den „Animatographen“, welchen ich mit Erlaubniss des Erfinders, Herrn R. Paul, hier vorführen will.

Die Animatograph-Bilder sind auf einem in Bewegung befindlichen Band aus durchsichtiger Celluloid photographirt. Die Zeit, welche zwischen jedem aufzunehmenden Bilde und dem nächstfolgenden vergeht, beträgt etwa $\frac{1}{50}$ Secunde. Eine Scene, die sich in einer halben Minute abspielt, erfordert also 1500 Bilder, die alle einander auf einem langen Streifen folgen. Werden diese Bilder in ihrer richtigen Reihenfolge mittels eines Mechanismus vor einer Laterne vorbeigeführt, welcher jedes Bild an seinen richtigen Platz zwischen die Linsen bringt, es daselbst einen kurzen Moment festhält, dann dasselbe weiter schiebt, um das nächstfolgende ebenfalls an derselben Stelle einen kurzen Moment festzuhalten, und so weiter — dann erscheint uns der durch das Bild fixirte und auf dem Schirm projecirte Vorgang, als ob er in Wirklichkeit sich abspielte. Sie sehen z. B. in einer Strassenscene die Wagen und Omnibusse sich bewegen; die Pferde heben ihre Beine, die Räder drehen sich, die Fussgänger und Polizisten spaziren vorbei. Alles

bewegt sich so, wie es sich wirklich auf der Strasse abspielt. Oder hier sehen Sie einige Kinder sich um eine Gartenbank herumtummeln (Fig. 55). Ein grosser Hund kommt, der Knabe springt zur Seite, fällt hin, erhebt sich und reibt sich seine Beulen. Oder ein Passagierdampfer startet vom Hafendamm in Dover: Sie sehen seine Räder sich drehen und die Menge am Ufer mit Hüten und Taschentüchern Lebewohl winken. Jetzt macht der Dampfer eine Schwenkung; Sie sehen, wie das Wasser zu Schaum spritzt, Sie bemerken die aufwirbelnden Rauchwolken, welche vom Schornstein aufsteigen. Nun biegt er um die Ecke und kommt ausser Sicht. Die Naturtreue der Bewegung ist so gross, dass man glaubt, Alles wirklich mit erlebt zu haben. Und so ist es schliesslich auch! Sie haben ebenso genau die Bewegung der Scene gesehen, wie Sie beim Phonographen die Stimme hören, welche einst Ursache der Eindrücke auf dem Cylinder gewesen ist. Von allen Bildern des „Animatographen“ gefallen mir am Besten die, welche Scenen aus der Natur darstellen, wie z. B. die Wellen der See, welche sich an den Felsen einer Bucht brechen und Schaum spritzend sich in ihr Inneres hinein wälzen.

Notiz. Seit dem Schluss dieser Vorlesung hat Herr Shelford Bidwell F. R. S. die in der Fussnote S. 62 erwähnten merkwürdigen Farbeffecte weiter studirt und einige ausserordentliche Erscheinungen aufgefunden. Eine Pappscheibe von etwa 15 cm Durchmesser ist zur Hälfte bedeckt mit schwarzem Sammet, während die andere Hälfte weiss oder grau bleibt. Aus letzterer wird ein Sector von 45° ausgeschnitten und zwar da, wo Weiss und Schwarz sich berühren. Jetzt wird die Scheibe am Rotationsapparat befestigt und gedreht, sodass sie etwa 6 bis 8 Umdrehungen in einer Sekunde ausführt. Hinter die Scheibe wird ein farbiger Gegenstand in solcher Lage aufgestellt, dass er bei jeder Umdrehung durch den offenen Sector zu sehen ist, und mit einer Lampe aus einer Entfernung von wenigen Centimetern stark beleuchtet ist. Die Umdrehungsrichtung muss so sein, dass auf den offenen Sector Weiss folgt, während ihm Schwarz vorausgeht. Betrachtet man jetzt das Bild während der Rotation, so erscheint jeder Theil desselben in einer blassen Farbe, welche complementär zu der ihm wirklich anhaftenden ist. Eine rothe Rose mit grünen Blättern erscheint als grüne Rose mit rothen Blättern. Ein blauer Stern auf gelbem Grunde erscheint als gelber Stern auf blauem Grunde. Schwarzer Druck auf weissem Papier erscheint als weisser Druck auf schwarzem Papier.

Dritte Vorlesung.

Polarisation des Lichtes.

Bedeutung der Polarisation. Herstellung polarisirten Lichtes. Polarisations-Modelle. Polarisatoren aus Glas, Kalkspath und Turmalin. Wie ein jeder Polarisator das polarisirte Licht auslöscht. Eigenthümlichkeiten der Krystalle. Gebrauch des polarisirten Lichtes, um falsche Edelsteine zu entdecken. Rubine, Saphire und Amethyste. Polarisation durch Doppelbrechung des Lichtes. Merkwürdige Farbeffecte im polarisirten Lichte, hervorgebracht durch Einschalten dünner farbloser Krystallplatten zwischen Polarisator und Analysator. Wirkungen, hervorgebracht beim Glas durch Druck und durch Erhitzen.

In der Wissenschaft werden oft schwerverständliche Worte angewandt, welche an sich sehr einfache und leichtfassliche Ideen ausdrücken; in Folge dessen wird der Glaube erweckt, als ob auch die vorgetragene Materie sehr schwierig zu verstehen sei, während die grösste Schwierigkeit lediglich darin besteht, den Sinn der Worte zu erfassen, die zur Beschreibung der Erscheinung benutzt worden sind.

Das in der Optik viel gebrauchte Wort „Polarisation“ ist einer von diesen Ausdrücken. Er klingt sehr gelehrt und schwierig, während die Idee, welche er ausdrücken soll, wirklich sehr einfach ist. Lassen Sie mich versuchen, Ihnen den Sinn des Wortes beizubringen, ehe wir uns den Kopf über das Wort selbst zerbrechen.

In meiner ersten Vorlesung unternahm ich es, Ihnen einen Begriff von den Wellen und deren Fortpflanzung zu geben. Ich bat Sie, wohl zu unterscheiden zwischen der oscillatorischen Bewegung der einzelnen Theilchen und der Vorwärtsbewegung der Wellen selbst. Verweilen wir zunächst bei der Bewegung der einzelnen Theilchen. Stellen Sie sich ein Partikelchen oder eine Gruppe von solchen Theilchen vor, welche sich in schneller Hin- und Herbewegung oder, um es gelehrter auszudrücken, in schneller Oscillation befinden. Ist das Theilchen von einem geeigneten Medium umgeben und finden die Schwingungen in genügend schneller Aufeinanderfolge statt, so sendet es Wellen in das umgebende Medium, welche von ihm als Centrum ausgehen und mit einer Geschwindigkeit sich fortpflanzen, die je nach der Elasticität und der Dichtigkeit des Mediums eine verschiedene ist. In dem Falle, wo das

Medium wie die Luft ein compressibles, d. h. zusammendrückbares ist, comprimirt der schwingende Körper (falls wie beim Schall entsprechend der Höhe des Tones 24 bis nahe 41 000 Schwingungen in der Secunde vor sich gehen) die Luft vor sich bei seiner Bewegung nach vorwärts und verdünnt die Luft hinter sich, sodass das schwingende Theilchen also Wellen der Verdichtung und Verdünnung ausendet. Ist wie in Fig. 56 der schwingende Körper eine Kugel, welche sich entlang der kurzen Strecke AB sehr schnell auf- und abwärts bewegt, so ist sie bestrebt, die Luft darüber und darunter zu verdichten und zu verdünnen, und diese Verdichtungen und Verdünnungen werden sich nach oben und nach unten fortpflanzen.



Fig. 56.

Schwerlich aber werden jemals Wellen der Compression und Dilatation sich nach rechts und links von der schwingenden Kugel ausbreiten, weil sie beim Auf- und Abspringen die Luft zu beiden Seiten weder verdichten noch verdünnen. In diesem Falle spricht man von longitudinalen Wellen und will damit ausdrücken, dass sie sich in derselben Richtung ausbreiten, in welcher die Schwingung geschieht, in unserem Falle also in verticaler Richtung. Wollen Sie Näheres über die Ausbreitung der Schallwellen wissen, so müssen Sie Professor Tyndall's Buch über den Schall lesen¹⁾ und wenn Sie noch gründlicher in die Theorie eindringen wollen, so müssen Sie Lord Rayleighs zwei Bände über die Theorie des Schalles studiren.²⁾

Aber jetzt stellen Sie sich bitte ein Medium vor, welches nicht wie die Luft zusammendrückbar, sondern wie Gelatine incompressibel ist, und bei welchem die Dichtigkeit klein ist im Vergleich zu der Steifigkeit (rigidity), welche es einer schnellen Schwingung entgegensetzt. Wenn Sie in diesem Falle eine Schwingung von genügend hoher Schwingungszahl erzeugen, so entstehen Wellen, welche sich mit grosser Geschwindigkeit fortpflanzen, aber nicht mehr in Richtung der Schwingung selbst. Im Gegentheil, diese Wellen breiten sich seitlich aus, nach allen Richtungen fortschreitend. Es möge Fig. 57 a. f. S. eine Kugel vorstellen, welche in die Mitte eines sie umgebenden grossen Blocks von Gelatine eingebettet ist, und welche in eine Schwingung auf- und abwärts wie zuvor, aber mit sehr

1) John Tyndall: „Der Schall“, 1897. Autorisirte deutsche Uebersetzung von A. v. Helmholtz und Cl. Wiedemann, 3. Auflage. Verlag von Fr. Vieweg & Sohn in Braunschweig.

2) Lord Rayleigh: „Theory of Sound“. London 1877. Autorisirte deutsche Uebersetzung von Prof. Neesen.

grosser Geschwindigkeit versetzt worden ist. Sie kann sich nicht aufwärts bewegen ohne das Bestreben, die Masse rings um sie herum mit sich zu ziehen und zu zerren, noch kann sie sich abwärts bewegen ohne die Gelatine mit sich nach unten zu reissen. Diese erzwungenen Bewegungen pflanzen sich nun nach aussen in allen Richtungen fort, so dass ein Theilchen bei a , sobald die Wellen in der festen Gelatine es erreichen, ebenfalls nach oben und unten zu gehen bestrebt ist. Wenn in irgend einem Medium, ob Gallerte oder nicht, die Theilchen in solcher Beziehung zu einander stehen, dass die Bewegung eines derselben einen seitlichen Druck (shearing stress) hervorzubringen bestrebt ist, so wird das Medium ebenso wie die Gallerte die Erregung seitlich fortpflanzen. In diesem Falle bezeichnet man die Wellen als „transversale“, womit man aussagen will, dass sie sich in einer Richtung fortpflanzen, welche senkrecht steht zu der, in welcher das Theilchen selbst sich bewegt.

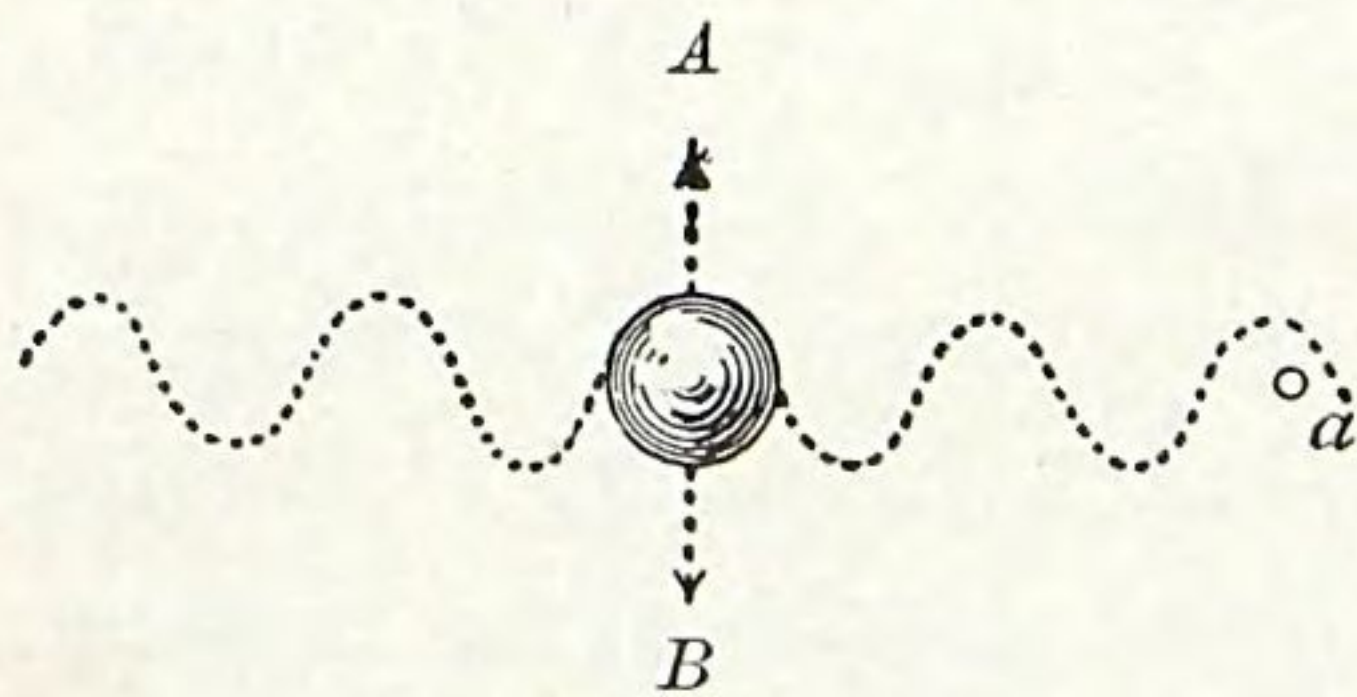


Fig. 57.

Die Lichtwellen sind Transversalwellen und, obgleich sie sich durch die Luft fortpflanzen, sind sie doch nicht den Schallwellen vergleichbar, da sie das vollkommenste Vacuum mit ungeheurer Geschwindigkeit durchschreiten. Sie durchheilen Tausende von Millionen Meilen

des luftleeren Raumes zwischen den Gestirnen in Bruchtheilen einer Secunde! Die Lichtwellen sind Wellen eines besonderen Mediums, welches unserer Annahme nach den ganzen unendlichen Raum ausfüllt und mit dem Namen „Aether“ bezeichnet wird. Fragen Sie mich, woraus der Aether besteht, so muss ich Ihnen offen gestehen, dass wir Physiker es selbst nicht wissen.

Aber wenn das Licht in einer wellenförmigen Fortpflanzung besteht, und wenn die Lichtwellen die vielen Millionen Meilen durchheilen, welche die Sterne von der Erde trennen, so ist es klar, dass sie Wellen irgend eines Mediums sein müssen: Sie sind keine Luftwellen, sie sind keine Wasserwellen, denn der Sternenraum ist frei von Luft und Wasser. Sie sind Wellen eines Mediums, welches, obgleich millionenmal dünner als Wasser und Luft, dennoch die Eigenthümlichkeit besitzt, einem seitlichen Druck einen grossen Widerstand entgegenzusetzen, einen Widerstand, der selbst denjenigen übertrifft, welchen der gehärtetste Stahl gegen Zug ausübt. Obgleich der Aether keine Gallerte ist, insofern sich die Dinge durch denselben ebenso frei bewegen wie wir uns durch die Luft

bewegen können, so ähnelt er doch der Gallerte in der Eigenschaft, dass er einem Zuge Widerstand entgegensetzt und die Schwingung senkrecht zur Schwingungsrichtung fortpflanzt. Obgleich wir weder die Dichtigkeit des Aethers kennen, welche freilich sehr klein sein muss, noch seine Elasticität, welche sehr gross sein muss, so kennen wir doch etwas, das vom Verhältniss beider Grössen abhängt, nämlich die Geschwindigkeit der Fortpflanzung dieser Aetherwellen, die wir eben „Licht“ nennen. (Siehe Anhang zur dritten Vorlesung am Ende des Buches).

Nachdem wir uns einen Begriff von den transversalen Wellen gebildet haben, wollen wir zurückgreifen auf das Wellenmodell, welches wir in der ersten Vorlesung benutzt haben (Fig. 2). Wie Sie sich erinnern, besteht dasselbe aus einer Reihe von kleinen, weissen Kugeln, entlang denen die Wellen von links nach rechts

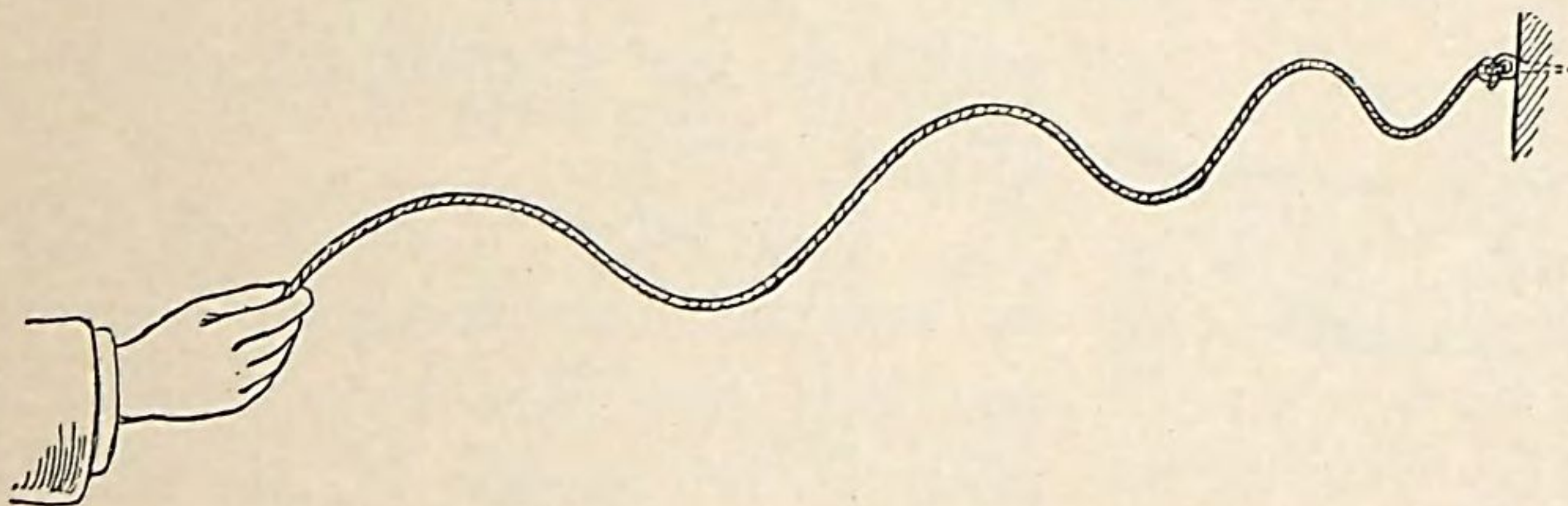


Fig. 58.

fortschreiten, obgleich jede Kugel sich von oben nach unten bewegt. Es ist dieses Wellenmodell darum ein solches für transversale Wellen, da die Richtung der Fortpflanzung senkrecht zur Richtung der Schwingung steht.

Wenn sich aber eine Welle in der Richtung von sagen wir a nach b fortpflanzt, so können wir die Bedingung der Transversalbewegung der Theilchen in verschiedener Weise erfüllen. Die kleinen, zur Richtung ab senkrechten Bewegungen brauchen nicht gerade vertical von oben nach unten vor sich zu gehen, sie können eine horizontale oder jede andere Richtung besitzen und doch stets zu ab senkrecht sein. Drehe ich meine Wellenmaschine so, dass die weissen Kugeln sich jetzt horizontal zu Ihnen hin- und von Ihnen fortbewegen, so bleibt die Welle nach wie vor eine transversale, zur Fortpflanzungsrichtung senkrecht gerichtete Bewegung.

Wenn ich quer durch den Saal eine lange Gummischnur spanne und ihr eines Ende in meiner Hand halte (Fig. 58), so kann ich dieses Band in transversale Schwingungen versetzen. Ich brauche nur meine

Hand schnell auf- und abwärts zu bewegen und sogleich entstehen Schwingungen des Bandes, welche ebenfalls auf- und abwärts vor sich gehen. Bewege ich meine Hand von links nach rechts, so erhalte ich auch Schwingungen in Richtung von links nach rechts, und falls ich, wie jetzt, meine Hand in einer Richtung schief zum Horizont bewege, so bringe ich auch schiefe Schwingungen hervor. Und alle diese Bewegungen pflanzt der Faden fort!

Nun, das Wort „Polarisation“ bedeutet nichts anderes, als dass die Bewegungen der die Welle fortpflanzenden Theilchen in irgend einer bestimmten zur Fortpflanzungsrichtung transversalen Richtung ausgeführt werden. Ist die Welle „vertical“ polarisirt, so heisst das, es sind die Schwingungen senkrecht zur Richtung der Fortpflanzung von oben nach unten gerichtet. Wenn ich sage, das Licht ist horizontal polarisirt, so meine ich weiter nichts, als dass die Bewegungen der Theilchen des Lichtäthers von rechts nach links

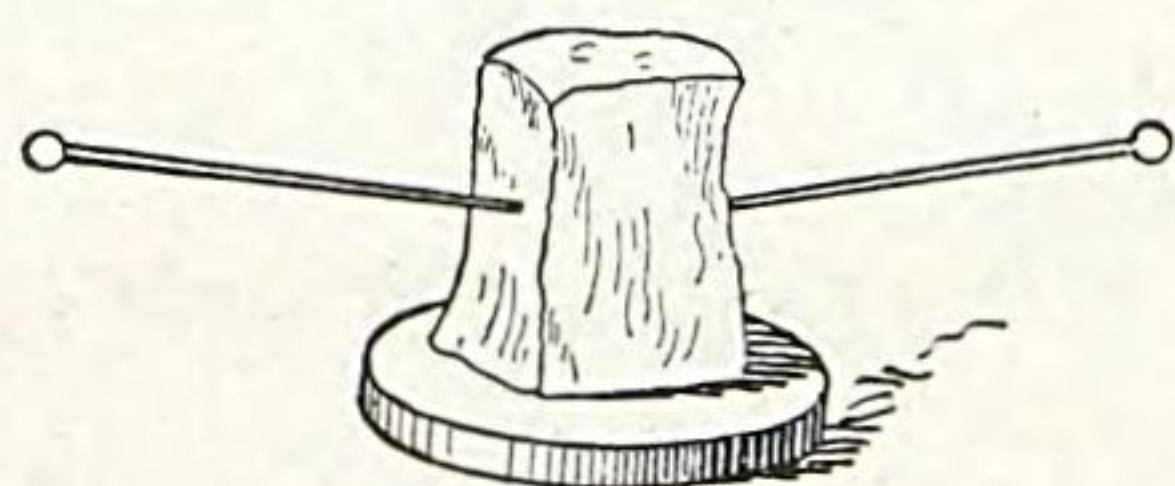


Fig. 59.

senkrecht zur Fortpflanzungsrichtung ausgeführt werden.

Hier habe ich ein Stück Gallerte. Es ist ausgezeichnet geeignet, um zu zeigen, wie sich eine polarisirte Schwingung fortpflanzt. Ich stecke in die Gallerte zwei Nadeln mit versilberten Knöpfen (Fig. 59), die eine auf die eine, die andere auf die andere Seite. Bemerken Sie wohl, wenn ich die eine in Schwingung von oben nach unten versetze, so schwingt die andere ebenfalls von oben nach unten. Hier haben wir eine vertical polarisirte Schwingung. Ertheile ich der einen einen Schwung von rechts nach links, so schwingt auch die andere von rechts nach links. Hier haben wir eine horizontal polarisirte Schwingung. Wenn ich die eine in kreisförmige Schwingung versetze, sodass der Knopf immer im Kreise sich bewegt, so thut es auch die andere; auch ihr Knopf bewegt sich im Kreise und giebt so ein Beispiel einer kreisförmig polarisirten Schwingung.

Nun lassen Sie uns zu den Lichtwellen selbst übergehen. Wenn Sie ein weisses Strahlenbüschel betrachten, so können Sie mittels des Auges nicht entscheiden, in welcher Richtung dasselbe polarisirt ist, ob von unten nach oben oder von rechts nach links. Ja, Sie können nicht einmal sagen, ob es überhaupt polarisirt ist.¹⁾

1) Nur in gewissen Fällen kann das Auge durch Uebung dahin gebracht werden, die Polarisationsebene, z. B. des vom Himmel ausgehenden blauen Lichtes,

Natürlich, da die Wellen so ausserordentlich klein sind und viele Millionen Schwingungen in einer einzigen Secunde ausführen, so kann das Auge unmöglich deren Bewegungen verfolgen.

Thatsächlich ist das Licht jeder natürlichen Lichtart, stamme es von der Sonne, von der elektrischen Lampe, von der Flamme oder von irgend einer Lichtquelle, unpolarisirt, d. h. es besteht aus Schwingungen, welche nicht in einer bestimmten Richtung vor sich gehen, weder von oben nach unten, noch von rechts nach links. Natürliches, von hoch erhitzten Körpern ausgesandtes Licht ist in jeder Beziehung „gemischt“. Nicht nur dass es, wie wir in der letzten Vorlesung gesehen haben, aus einem Gemisch verschiedenfarbiger Strahlen besteht — also aus Licht verschiedener Wellenlänge —, es besteht auch aus Wellen, bei denen die Schwingungsebene der bewegten Theilchen sich stetig ändert. Schwingen diese in dem einen Augenblick auf und ab, so gehen sie einen Augenblick später in eine Richtung von rechts nach links oder in eine andere schiefe Richtung über, oder sie nehmen eine kreisförmige oder eine elliptische oder womöglich eine noch complicirtere Form an.

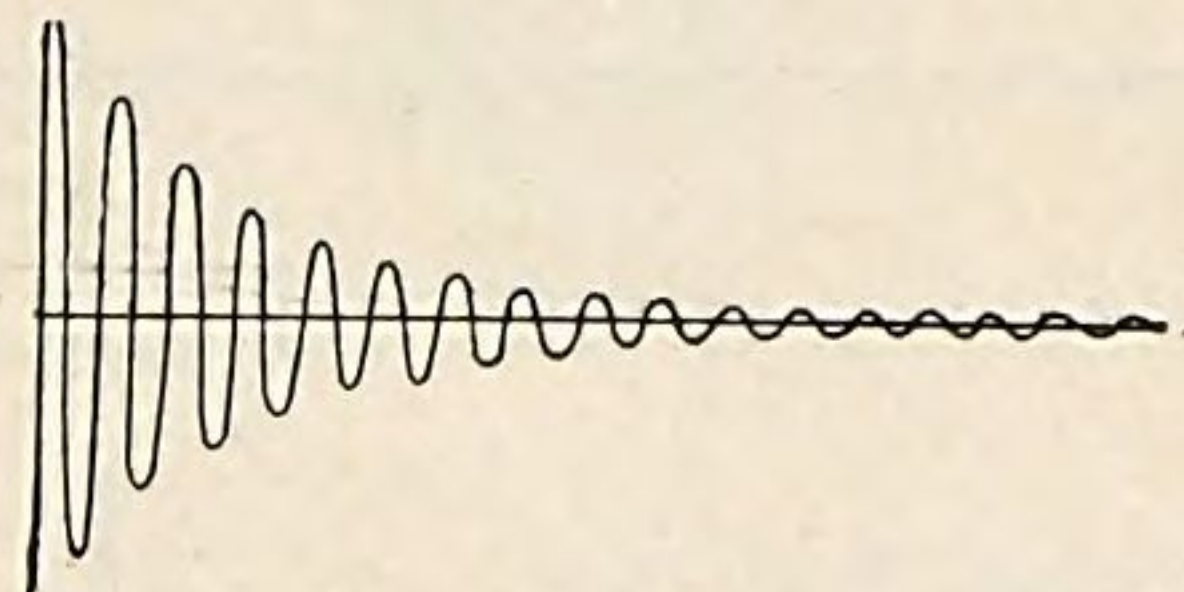


Fig. 60.

Stellen Sie sich vor, wie das Licht von der weissglühenden Spitze des Kohlenstabes meiner elektrischen Lampe ausgeht. Die Theilchen der weissglühenden Kohle stossen in wilder Bewegung gegen einander, theilen so beim Schwingen auch dem Aether Schwingungen mit und rufen Aetherwellen hervor. Wenn irgend ein Theilchen einen plötzlichen Stoss erhält, so zittert es hin und her und führt eine Schwingung mit einer grossen Anzahl kleiner Kräuselungen aus, welche wir durch die Curve in Fig. 60 darstellen können.¹⁾ Jede solche Schwingung würde aber bald absterben, wie der Ton einer geschlagenen Claviersaite schliesslich aufhört, wenn man sie austönen lässt. Aber ehe die

zu entdecken, welches in einer Richtung polarisirt ist, die senkrecht steht zur Position der Sonne. Durch Uebung erlangt man schliesslich die Fähigkeit, beim Betrachten des blauen Himmels die als „Haidingersche Büschel“ bekannten Erscheinungen zu erkennen, die eine Folge der schwachen polarisirenden Eigenschaften der brechenden Substanz im Auge sind.

1) Nach Untersuchungen Fizeaus sind es im Mittel bei Anwendung gewöhnlichen Lichtes wenigstens 50000. Professor Michelsons Experimente, bei denen Wellen zur Interferenz gebracht werden, die einen Gangunterschied von Millionen von Wellenlängen besitzen, beweisen, dass die mittlere Anzahl der Kräuselungen bei jedem Wellenzug nach Millionen gerechnet werden muss.

Bewegung abgestorben ist, hat vielleicht ein anderer Stoss eine neue Schwingung in einer neuen Richtung erzeugt, welche ebenfalls wieder langsam abstirbt. Stellen Sie sich nun Millionen solcher kleinen Theilchen vor, alle in Bewegung und Schwingung begriffen und Wellenzüge im Aether nach aussen sendend. Dann ist es nicht mehr wunderbar, dass die äusserst complicirten Mischungen von Wellenformen und Schwingungsrichtungen in dem resultirenden Lichte auftreten.

Da natürliches Licht nicht in einer bestimmten Richtung schwingt, so versteht es sich von selbst, dass wir zur Erzeugung polarisirten Lichtes etwas thun müssen, damit das natürliche Licht sich wie polarisirtes verhält.

In der Tafel III habe ich acht verschiedene Methoden zur Erzeugung polarisirten Lichtes aufgezählt, welche wir einzeln besprechen wollen.

Tafel III. Polarisatoren.

Princip		Natur des Apparates	Seite
Durch Reflexion . . .	I	Schwarzes Glas beim Einfallswinkel 57°	101
	II	Delezennes Polarisator . . .	79
Durch Brechung . . .	III	Glasplatten unter dem Winkel 57°	101
	IV	Glasplattensätze schief zu den Lichtstrahlen	101
Durch Doppelbrechung .	V	Isländischer Doppelspath . .	77
Durch Doppelbrechung	VI	Doppel-Bild-Prisma	80
mit Absorption . . .	VII	Turmalinplatte	77
Durch Doppelbrechung	VIII	Nicol'sches Prisma und seine neueren Modificationen . .	78
mit innerer Reflexion			

Ehe wir aber zu den einzelnen Methoden übergehen, wollen wir noch einmal die Schwingung der Gummischnur betrachten und sehen, wie diese polarisirt werden kann.

Ich habe jetzt die Gummischnur durch einen Kasten *P* mit verticalen Fächern (Fig. 61) gezogen. Diese Fächer begrenzen die Bewegungen und gestatten nur verticalen Schwingungen den Durchgang. Versetze ich die Schnur in irgend einer Weise in Schwingung, so ist es nur die verticale Componente der Schwingung, welche durch den Kasten hindurchgelangt. Nach dem Durchgang durch den Kasten kommen die Wellen „polarisirt“ zum Vorschein. Lege ich den

Kasten P um, so lässt derselbe nur horizontale Componenten der Schwingung hindurch (Fig. 62). Was wird also geschehen, wenn ich den Faden durch einen zweiten ähnlichen Kasten A schicke? Das hängt ganz von der Stellung beider Kästen gegeneinander ab. Ist der erste mit seinen Fächern vertical gestellt, dann polarisirt er die Wellen in verticaler Richtung, und so polarisirt treffen diese Wellen beim Weitermarschiren den zweiten Kasten A . Stehen dessen Fächer ebenfalls vertical, so werden die ankommenden vertical gerichteten Wellen durch ihn hindurch gehen. Werden beide Kästen um 90 Grad

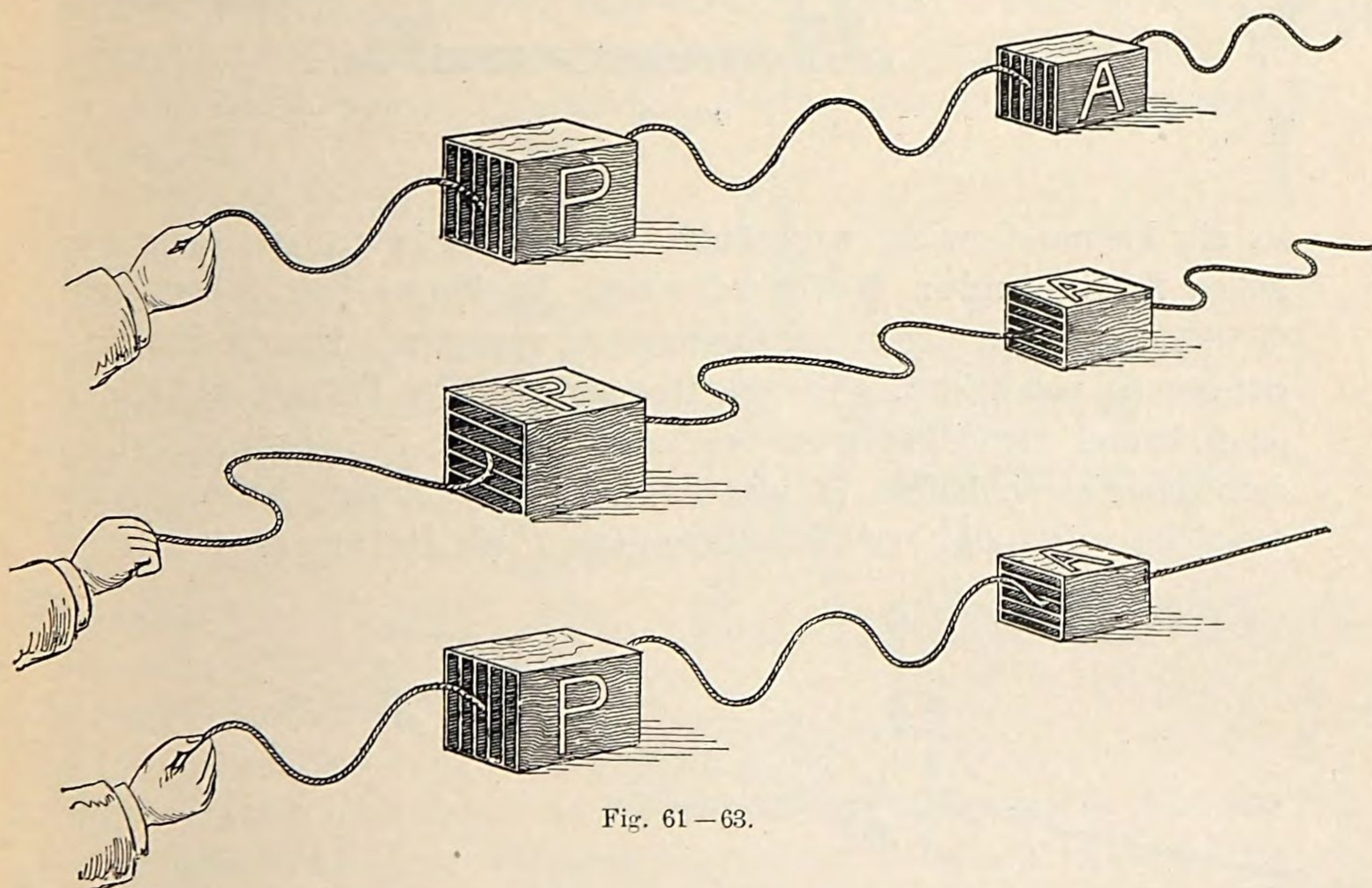


Fig. 61 — 63.

gedreht und auf die Seite gelegt, dann polarisirt der erste die Wellen in horizontaler Richtung, und diese Wellen gehen durch die horizontal gerichteten Fächer des zweiten. Habe ich aber den ersten Kasten P vertical, den zweiten A horizontal gestellt (Fig. 63), so werden die von P vertical polarisirten Wellen vom zweiten Kasten abgeschnitten und nicht hindurchgelassen. Wie die Stellung von P auch sein mag, stets wird er die Wellen polarisiren: Ist dann A mit seinen Fächern zu denen von P parallel gerichtet, so lässt er die Wellen hindurch, steht er aber senkrecht dazu, schneidet er dieselben ab.

Auf dem Vorlesungstische ist ein anderes Modell aufgestellt, welches dieselbe Thatsache noch besser illustriert. Verstehen Sie dieses, so werden Sie keine Schwierigkeit haben, auch den optischen

Apparat zu verstehen, welchen wir nachher gebrauchen werden. Bei diesem Modell werden die Schwingungen einer seidenen Schnur — am besten zu sehen von denjenigen, welche gerade vor dem Tische sitzen — dadurch erzeugt, dass man sie mit dem einen Ende an der Zinke einer Stimmgabel befestigt, deren Schwingungen mit Hülfe einer elektromagnetischen Vorrichtung dauernd im Gang erhalten werden. An dem anderen, entfernten Ende der Schnur

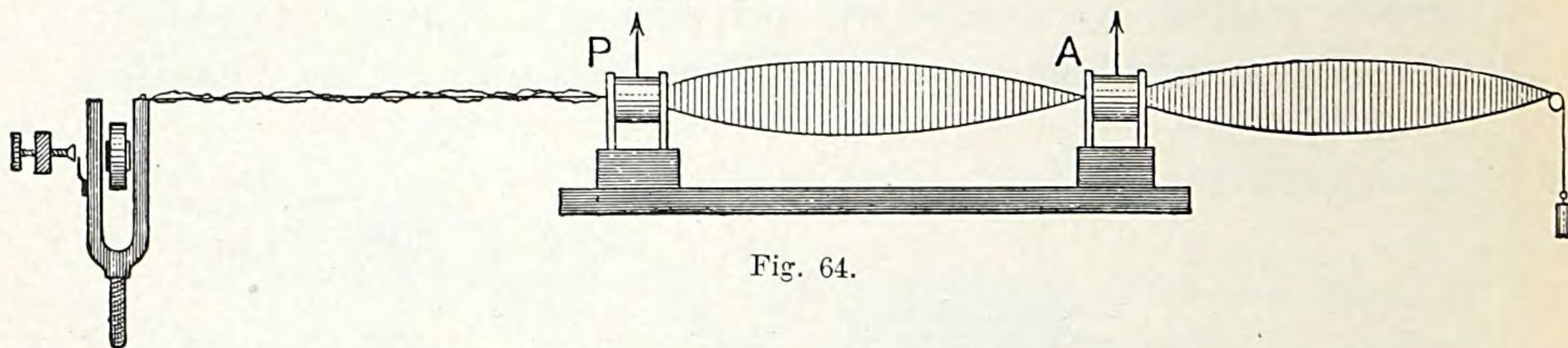


Fig. 64.

ist ein kleines Gewicht angehängt, welches so justirt ist, dass der Faden in stehenden Wellen schwingt. In kurzer Zeit haben sich die Schwingungen denen der Stimmgabel angepasst. Um die Schwingungen zu polarisiren, sind die Bewegungen des Fadens mit Hülfe eines Paares von Glasplatten beschränkt, welche in hölzernen Cylindern montirt sind (Fig. 64 und 65). In dem ersten Knotenpunkt des Seiles wirkt das erste Glasplattenpaar *P* als Polarisator, sodass

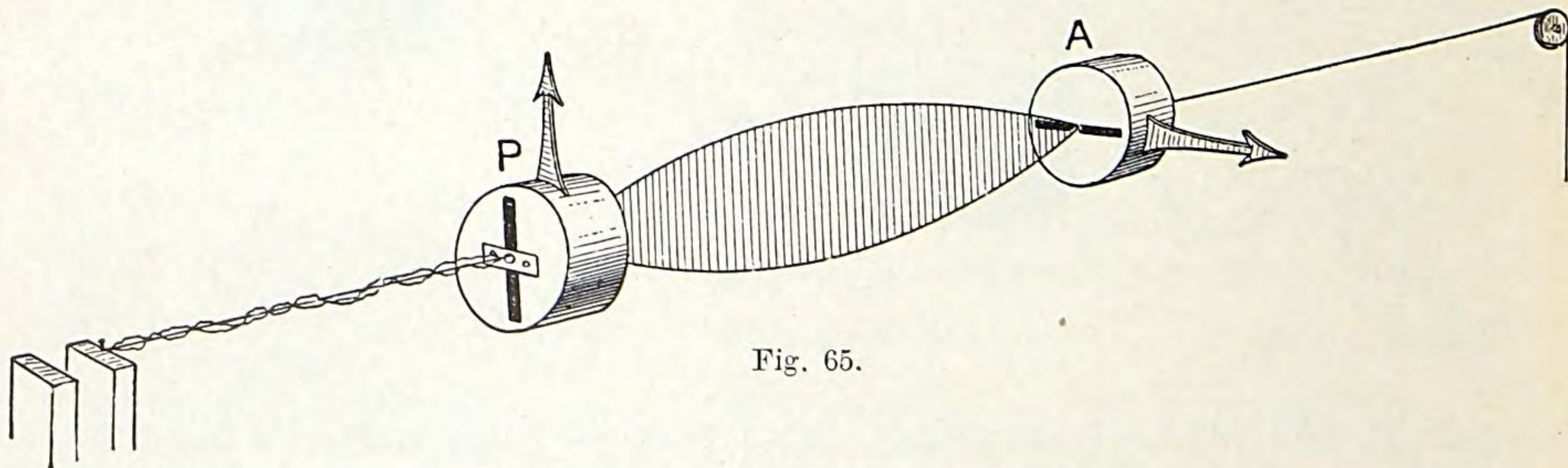


Fig. 65.

die Schnur jenseits des Punktes in derjenigen Ebene schwingt, welche ihr von *P* aufgedrückt worden ist. Ein auf dem hölzernen Cylinder befestigter Zeiger giebt die Richtung der Polarisationssebene an.¹⁾ Das zweite Glasplattenpaar befindet sich beim zweiten Knotenpunkt und wirkt als Analysator *A*. Die Schwingungen des Fadens sind durch den Polarisator *P* vertical gerichtet; stelle ich wie in Fig. 64 den Analysator ebenfalls vertical, so lässt er die Schwingungen ungehindert hindurch. Wenn aber (wie im vorigen Experiment mit

1) Betreffs des Ausdrucks „Polarisationsebene“ siehe die im Anhang zu dieser Vorlesung am Schlusse des Buches gemachten Bemerkungen.

den Kästen) der Analysator um 90 Grad gedreht wird, sodass der Schlitz zwischen den Glasplatten senkrecht zu den Schwingungen zu liegen kommt, so werden letztere vollständig abgeschnitten. Wiederholen wir unser Resultat also noch einmal: Wenn Polarisator und Analysator einander parallel gestellt sind, so werden die Schwingungen ungehindert hindurch gelassen, während sie abgeschnitten und ausgelöscht werden, wenn Polarisator und Analysator zu einander senkrecht gerichtet sind. Wir können demnach mit grosser Genauigkeit die Richtung der Schwingungen feststellen, welche aus dem Polarisator ausgetreten sind, indem wir den Analysator in eine solche Lage bringen, bei welcher er die Schwingungen ungehindert hindurchlässt oder vollkommen vernichtet.

Warum sollen wir aber länger bei dem Modell verweilen, wenn wir im Stande sind mit Lichtwellen selbst zu operiren? Mein Assistent sendet auf den Schirm ein weisses Strahlenbündel der elektrischen Lampe innerhalb der Projectionslaterne. Er bringt jetzt in den Strahlengang einen grossen Polarisator *P* (Fig. 66).

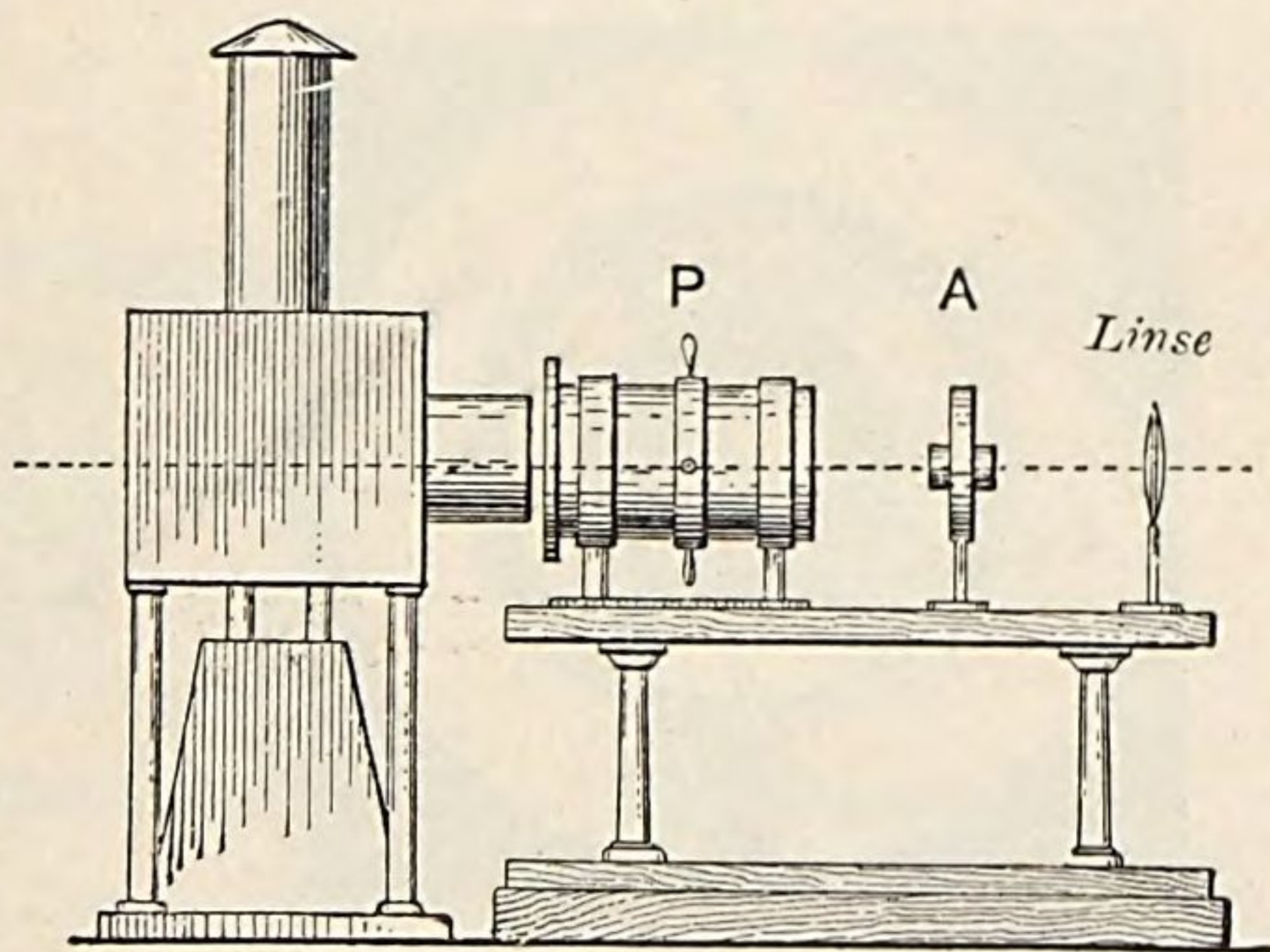


Fig. 66.

Ich werde bald erklären, woraus dieser Polarisator besteht. Es wird derselbe nun so gestellt, dass nur diejenigen Lichtwellen den Schirm erleuchten, welche in verticalen Richtungen schwingen. Der weisse Lichtfleck auf der Tafel rührt jetzt thatsächlich von Strahlen her, deren Theilchen lediglich auf- und abwärts schwingen. Ihr Auge würde Ihnen nicht sagen können, ob das Licht in verticaler Richtung schwingt, oder ob es überhaupt polarisirt ist. Um uns von dieser Thatsache zu überzeugen, müssen wir unsere Zuflucht zu dem Analysator nehmen. Dieser Analysator *A* ist weiter nichts als ein kleiner Polarisator. Damit Sie denselben besser erkennen, ist er — wie Fig. 67 a. f. S. zeigt — mittels dünner Fäden auf einer ringförmigen Scheibe montirt, deren Schatten Sie auf dem Schirm deutlich erkennen können. Wird der Analysator in die richtige Lage gebracht, in der er Auf- und Abwärtsbewegungen hindurchlässt, so gehen die aus dem Polarisator kommenden Wellen ungehindert durch ihn hindurch, und beide, der Polarisator und

Analysator sind klar und durchsichtig wie Glas. Drehe ich den Analysator um 90 Winkelgrade, so löscht er, obgleich durchsichtig wie Glas, dennoch die verticalen Schwingungen vollständig aus und kein Licht geht durch ihn hindurch (Fig. 68).

Das Auslöschen des Lichtes beim Drehen um 90 Grad ist ein Zeichen, dass das Licht polarisirt war. Laufen die Ebenen des Polarisators und Analysators einander parallel — beide vertical oder beide horizontal —, dann erhalten wir das „helle Feld“ des durchgelassenen Lichtes. Kreuzen sich die Ebenen von Polarisator und Analysator — die eine vertical, die andere horizontal oder umgekehrt —, dann wird das Licht ausgelöscht und wir erhalten das „dunkle Feld“.

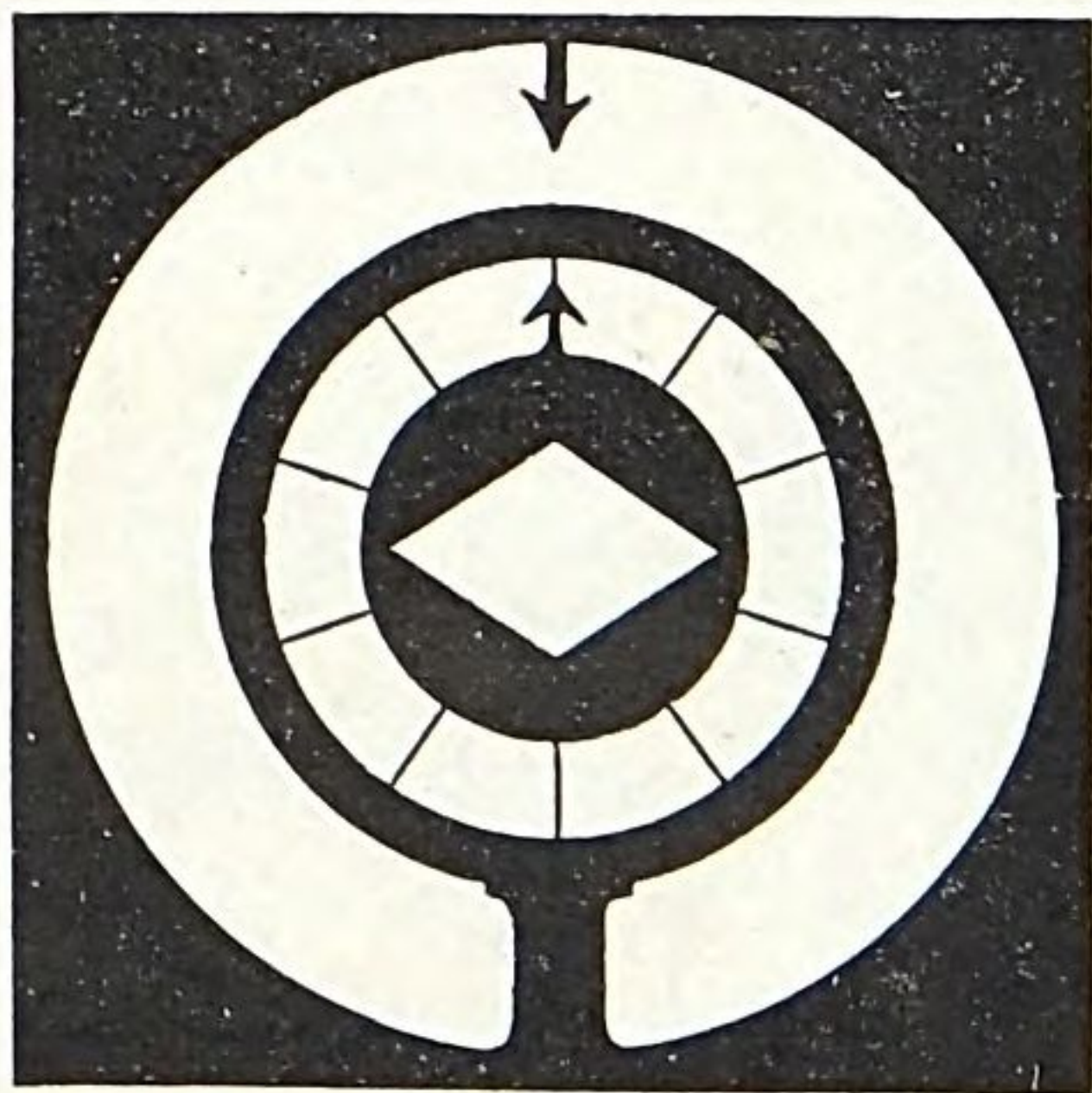


Fig. 67.

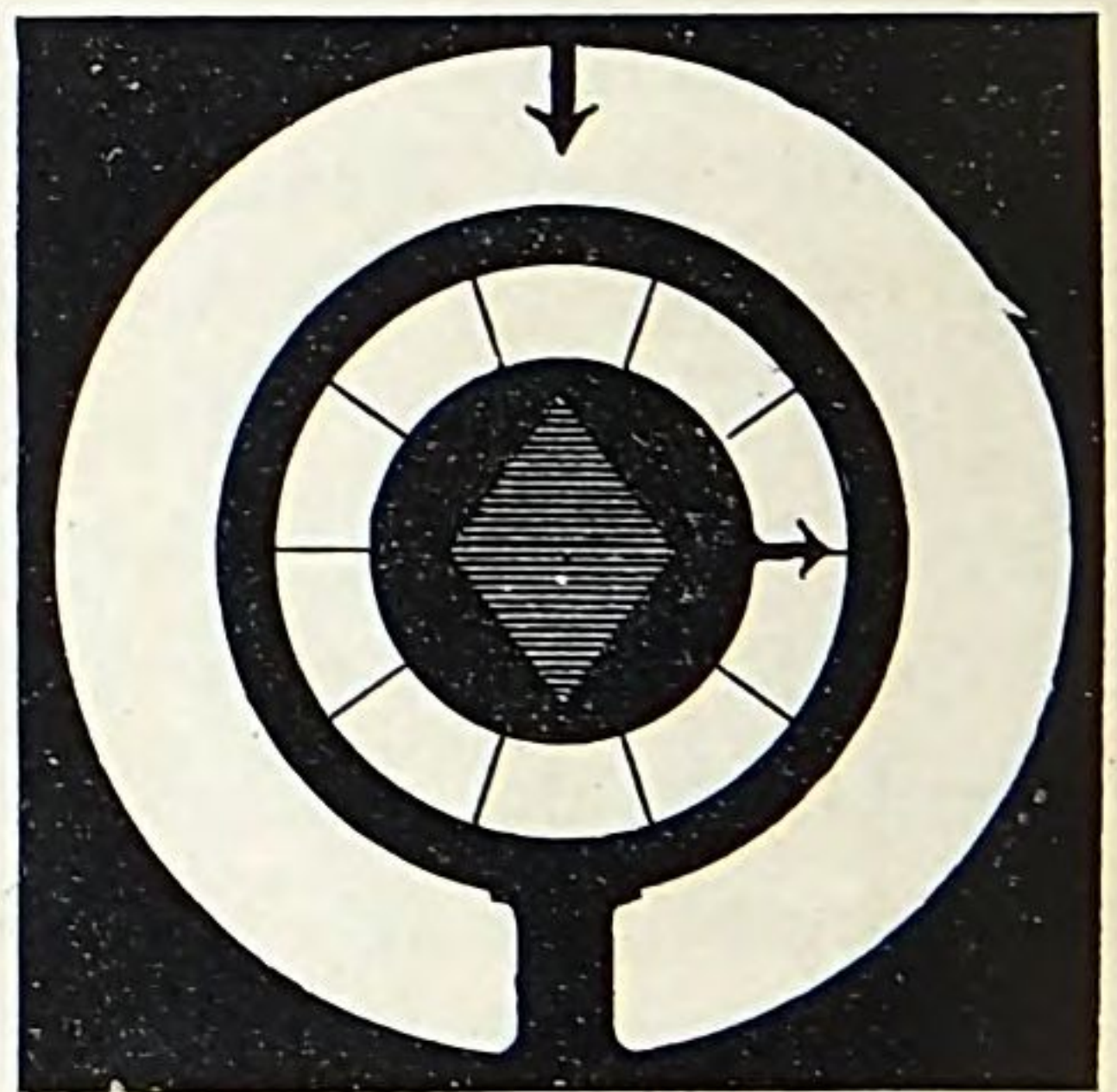


Fig. 68.

Hier habe ich einen Edelstein Namens Turmalin, welcher in Gestalt dünner Scheiben die Eigenschaft besitzt, das Licht zu polarisiren. Meist hat dieser Edelstein¹⁾ eine dunkelgrüne Farbe; er wird aber auch in brauner, dunkelblauer und selbst in rubinrother Färbung gefunden. Ich bringe jetzt in den Gang der auf den Schirm fallenden weissen Strahlen eine dünne Platte braunen Turmalins (Fig. 69). Der Lichtfleck wird dunkler, denn die Platte nimmt mehr als die Hälfte des Lichtes weg. Dafür ist das durch die Platte gegangene Licht polarisirt, und zwar sind die Schwingungen parallel zur längeren Seite der Platte gerichtet. Jetzt bringe ich eine zweite dünne Turmalinplatte in den Strahlengang, und zwar lege ich sie direct auf die erste. Sind sie einander parallel gerichtet, so geht Licht durch

1) Der dunkelgrüne Turmalin wird auch oft als Brasilianischer Smaragd bezeichnet, obgleich er ganz verschiedener Zusammensetzung ist, wie ein Smaragd. Die Bischöfe der südamerikanischen katholischen Kirchen trugen Turmalin in ihren Bischofsringen anstatt von Smaragden.

beide hindurch (Fig. 70); wird eine von beiden aber um 90 Grad gedreht, sodass sie sich kreuzen — wie in Fig. 71 —, so geht kein Licht an der Stelle hindurch, an der sich beide Platten überlagern. Die eine schneidet alle horizontalen Schwingungen bzw. die horizontalen Componenten der Schwingungen ab, die andere vernichtet alle verticalen Schwingungen beziehentlich die verticalen Componenten der Schwingungen. Daher kommt es, dass sie bei der Kreuzung ein „dunkles Feld“ hervorbringen. Die eine wirkt als Polarisator, die andere als Analysator.

Lassen Sie uns zu dem grossen Polarisator zurückkehren (Fig. 66), welchen wir beim vorigen Experiment gebrauchten und welcher so klar wie Glas war. Er besteht aus Isländischem Doppelspath, einem natürlichen Krystall, welcher einst sehr wohlfeil war, jetzt aber sehr selten und kostbar geworden ist.

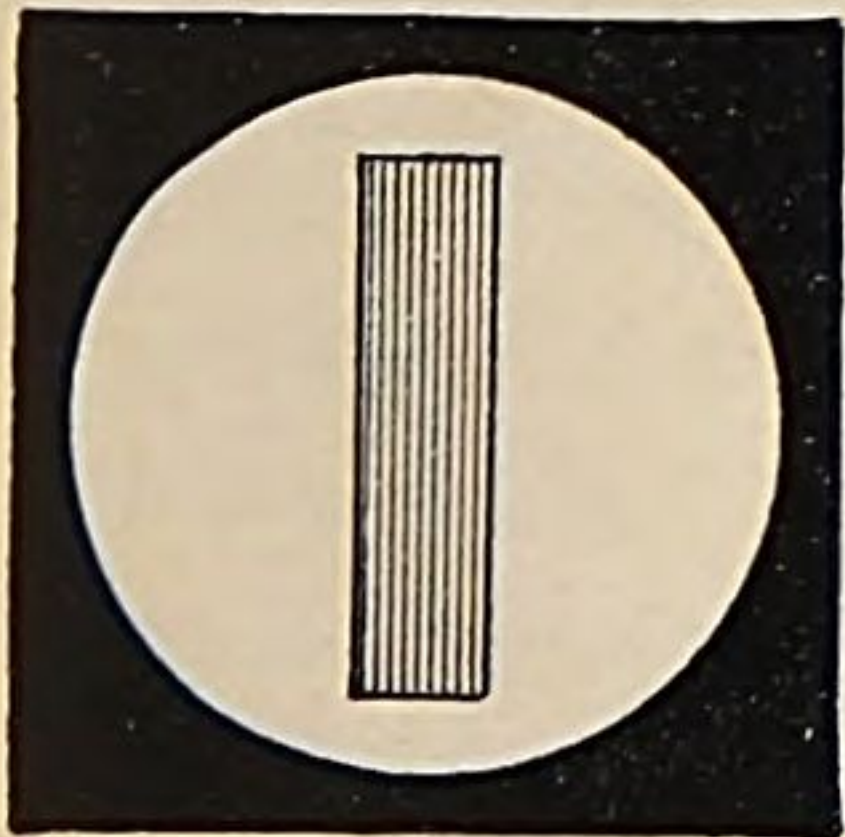


Fig. 69.



Fig. 70.

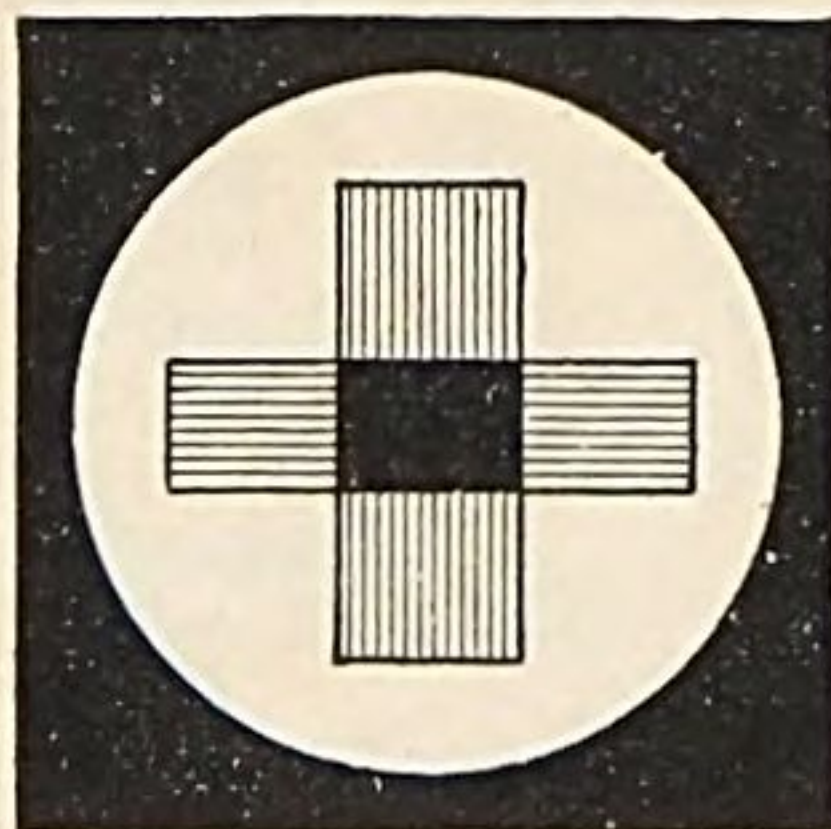


Fig. 71.

In dem Zustande, in welchem er aus den Gruben von Island importirt wird, besitzt dieser Spath die besondere Eigenschaft, die man als „Doppel-Brechung“ bezeichnet: Wenn Sie durch denselben hindurch blicken, so sehen Sie alles doppelt. Hier ist ein kostbares Exemplar in einer Röhre montirt; blicken Sie durch sie hindurch Ihren Finger an, so werden Sie zwei Finger sehen. Der Doppelspath ist also eine Substanz, welche die Lichtwellen in zwei Theile spaltet und so zwei Bilder liefert; aber noch mehr, bei dieser Trennung des Lichtes wird jeder Lichtantheil polarisirt, und zwar in zwei zu einander senkrechten Ebenen. Wir brauchen aber nicht zwei Bilder; vielmehr wollen wir nur eins haben. Was müssen wir thun? Wir bedienen uns der Methode, welche vor 80 Jahren William Nicol, ein berühmter schottischer Naturforscher, angewandt hat, und construiren aus dem Krystall des Kalkspaths ein „polarisirendes Prisma“ oder ein nach dem Erfinder benanntes Nicolsches Prisma. Hier habe ich mehrere Nicolsche Prismen von verschiedener Grösse, ausser-

dem noch einige moderne Modificationen des Nicolschen Prismas und ein Modell aus Holz, welches die Methode von Nicol näher erläutert. Ein Stück Isländischer Doppelspath (Fig. 72) geeigneter Dimension wird mit Hülfe eines Kupferdrahtes, welcher als Säge dient und unter Benutzung von Schmirgel in zwei Theile zerschnitten, und zwar längs der Richtung vom einen abgestumpften Ende zum anderen; darauf werden die Schnittflächen polirt und beide Stücke mittels Canadabalsams wieder zusammengekittet. Die Wirkung dieses Nicolschen Prismas ist folgende: Die durch die schräge Endfläche eintretenden Wellen werden in zwei Theile getheilt, welche im Innern verschiedene Richtungen einschlagen und unter verschiedenen Winkeln

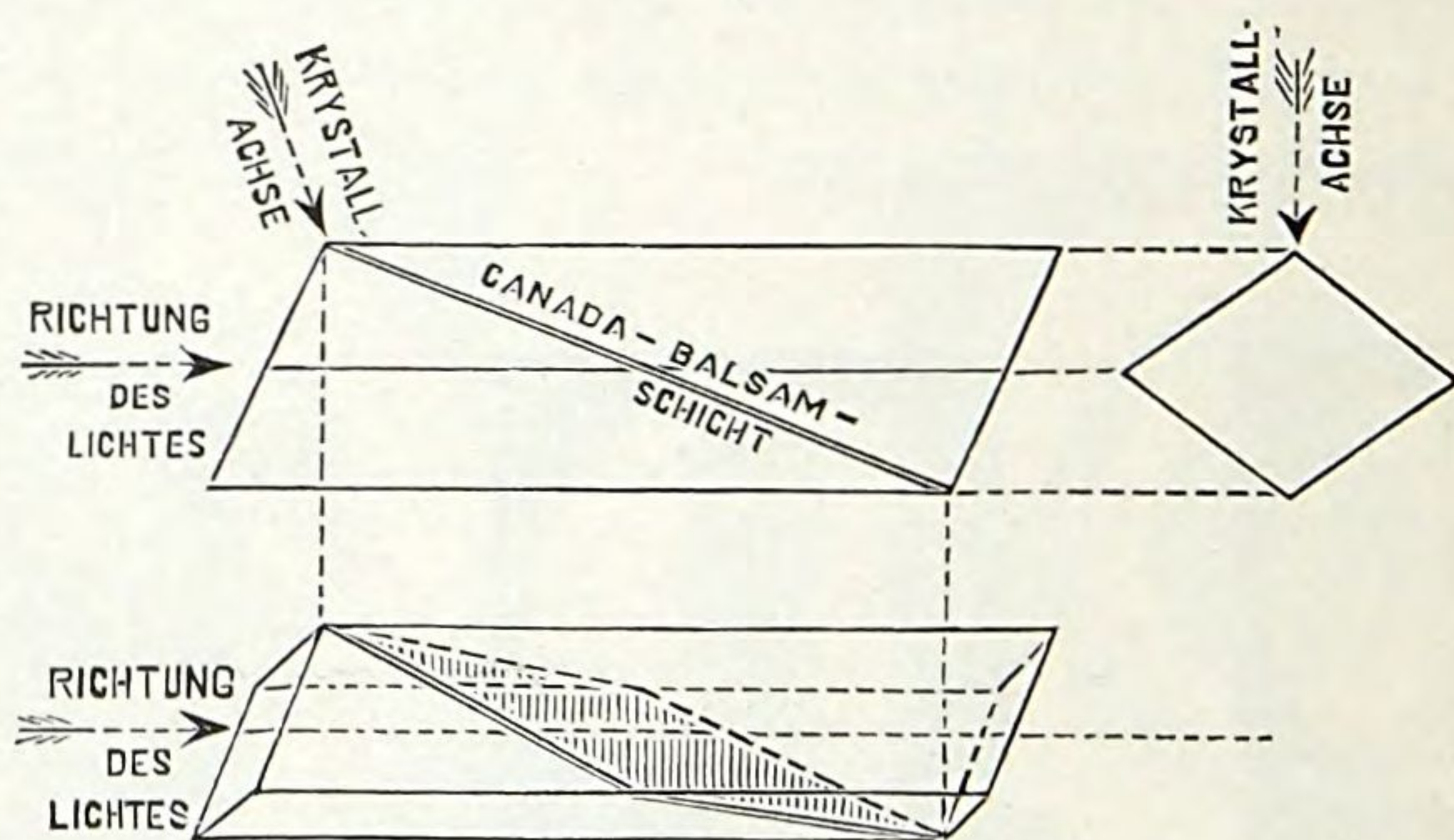


Fig. 72.

auf die Trennungsfläche (Kittfläche) auftreffen. Die Folge davon ist, dass das eine der beiden Strahlenbüschel von der Kittschicht wie von einem Spiegel zur Seite reflectirt wird, während das andere Strahlenbüschel durch die Schicht hindurchgeht und aus dem Nicolschen Prisma an der anderen Endfläche austritt. Auf diese Weise kommt also nur ein Büschel zum Vorschein, während das andere durch Reflexion beseitigt ist.¹⁾ Die Nicolschen Prismen haben



Fig. 73.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Der Deutlichkeit wegen werde hinzugefügt, dass die beiden senkrecht zu einander polarisirten Strahlen, in welche sich der auffallende Strahl beim Eintritt in das Nicolsche Prisma zerlegt, sich daselbst mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen. Dementsprechend ist der Brechungsquotient von Kalkspath für beide Strahlenarten verschieden gross, sodass bei geeigneter Wahl des Kittes der eine Strahl (ordinäre) an der Kittschicht eine totale Reflexion erleidet, während der andere Strahl (extraordinäre) ungehindert weiter geht. Dies tritt auch noch ein, wenn das polarisirende Prisma, wie z. B. in der Glanschen oder Hartnackschen Form, senkrecht zur Strahlenrichtung stehende Endflächen besitzt.

demnach schiefe Endflächen von der Gestalt der Fig. 73.¹⁾ Die Schwingungen, welche zum Vorschein kommen, haben eine Richtung parallel zur kleineren Diagonale (Richtung des Pfeiles in Fig. 73), während die unterdrückten Strahlenpartieen parallel zur längeren Diagonale schwingen. Der grosse Polarisator, welcher sich vor der Laterne befindet, ist ein solches Nicolsches Prisma.²⁾

Lassen Sie uns ein kleines Weilchen beim Phänomen der Doppelbrechung verweilen, welches uns zwei Lichtbüschel verschafft, die in verschiedenen, zu einander senkrechten Ebenen polarisirt sind. Das in Fig. 75 a. f. S. abgebildete Wellenmodell ist construirt, um zwei Wellenzüge zu zeigen, die zu einander senkrecht polarisirt sind. Es

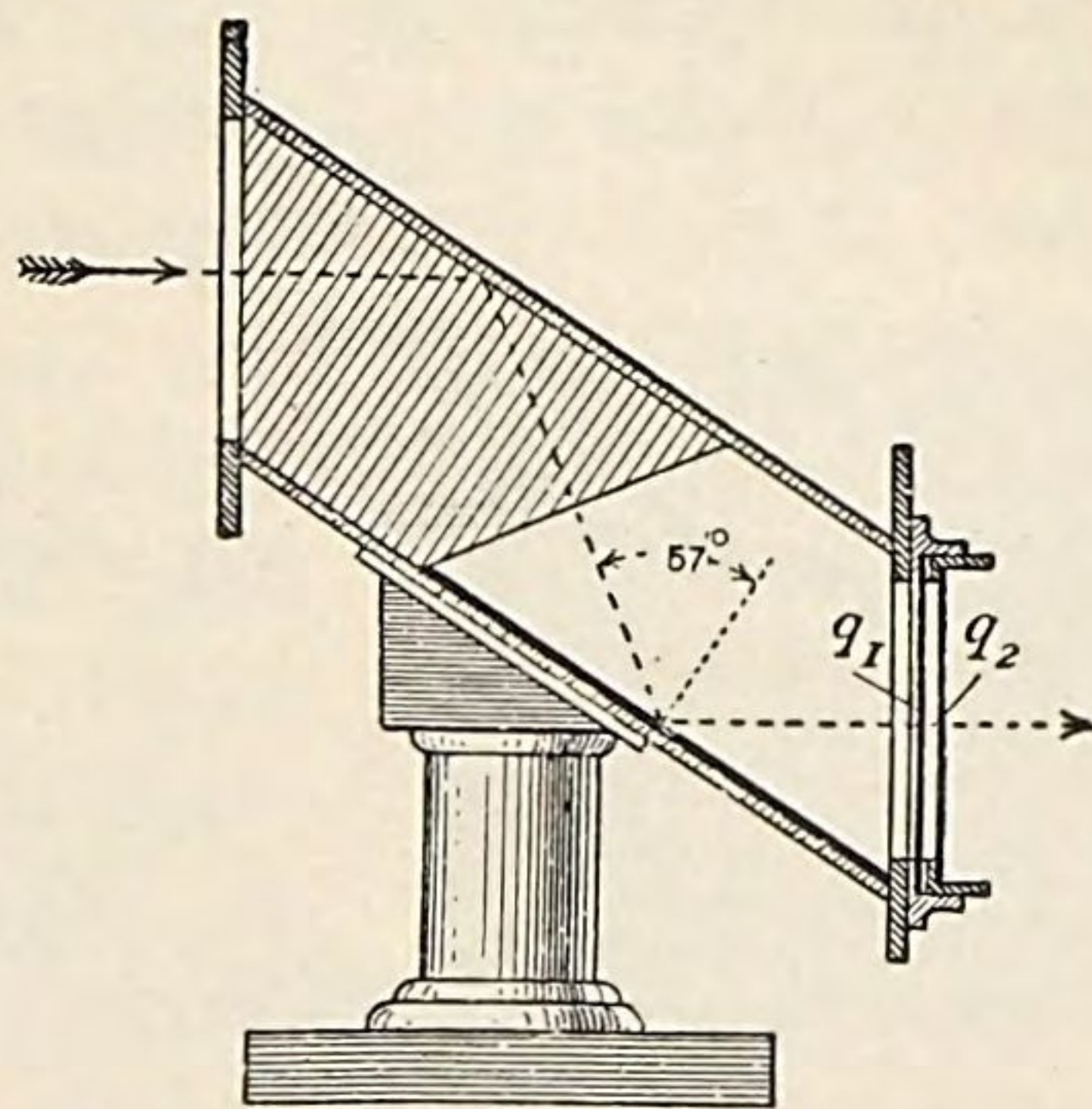


Fig. 74.

sind zwei von versilberten Knöpfchen gebildete Wellen, welche beide beim Drehen der Kurbel des Apparates vorwärts schreiten. Beide haben dieselbe Wellenlänge, beide schreiten in demselben Tempo und nach derselben Seite fort. Aber ein Unterschied ist zwischen ihnen

1) Bei der Foucaultschen Modification sind die Endflächen ebenfalls schräg; dagegen ist die Kittschicht zwischen beiden Krystallprismen ersetzt durch eine Luftschicht. In Hartnack's und Prazmowski's Prisma wird Leinöl als Kittschicht benutzt; die Endflächen stehen hier jedoch rechtwinklig zur Längsrichtung.

2) In Folge der Seltenheit grosser Kalkspathkrystalle können auch grosse Nicolsche Prismen nur durch Zahlung hoher Preise beschafft werden. Im Jahre 1888 construirte Ahrens für mich einen grossen reflectirenden Polarisator, der eine Apertur von $7\frac{1}{2}$ cm hatte. Für Projectionen ist derselbe dem Nicolschen Prisma ganz ebenbürtig, dabei aber billiger. Bei diesem nach einem von Delezenne angegebenen Prinzip construirten Polarisator (Fig. 74) wird das Licht erst durch ein geeignet geformtes Glasprisma unter dem Polarisationswinkel von etwa 57 Grad gegen eine Platte aus schwarzem Glase gelenkt, die mit einem Bündel dünner mikroskopischer Deckgläschen bedeckt ist. Von hier wird das Strahlenbündel reflectirt und geht parallel zu seiner ursprünglichen Richtung weiter. Diese Form hat aber den einen Nachtheil, dass sie das Licht in einer festen Ebene polarisirt und nicht gedreht werden kann, ohne den Strahl in eine andere Lage zu bringen. Um diesen Fehler zu vermeiden, rieth ich, einen „optischen Dreher“ (optical rotator) an das Ende des Prismas zu setzen, welcher aus zwei Viertelwellenlängenplatten q_1 und q_2 besteht. Die erste dieser Glimmerplatten ist mit ihrer Axe um 45 Grad gegen die Richtung der Polarisationsebene geneigt; die zweite q_2 ist in einem beweglichen Rahmen montirt, sodass ihrer Axe jede gewünschte Richtung zur Polarisationsebene gegeben werden kann. Durch Drehung der zweiten Platte wird auch eine Drehung der Polarisationsebene bewirkt.

vorhanden: bei dem einen gehen die Verschiebungen unter 45 Grad gegen den Horizont geneigt in gewisser Richtung vor sich; beim anderen sind die Verschiebungen ebenfalls unter 45 Grad geneigt, haben aber die entgegengesetzte Richtung. Im Innern des Kastens ist ein Mechanismus vorhanden, welcher diese Bewegungen bewirkt, durch die Sie eine Vorstellung von der Bedeutung der Worte erhalten, dass zwei Wellen unter einem rechten Winkel (90 Grad) zu einander polarisirt. sind.

Es bleibt nun noch zu erklären, warum der Kalkspath das Licht in zwei Theile von entgegengesetzter Polarisationsrichtung theilt.

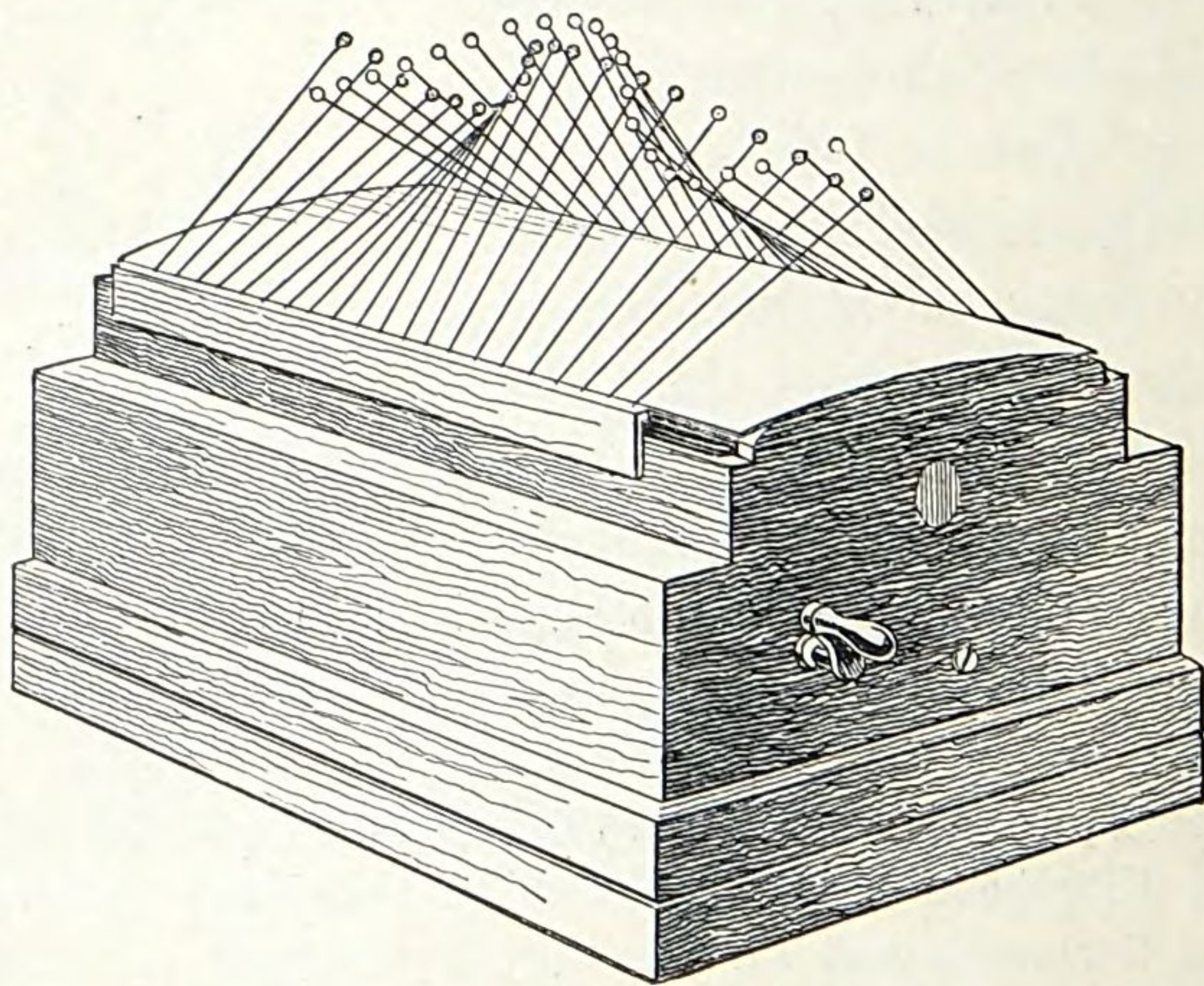


Fig. 75.

Zunächst wollen wir zeigen, dass dem wirklich so ist. Hier ist ein Stück Kalkspath als ein doppelt brechendes Prisma¹⁾ montirt. Vor der Laterne ist zunächst eine Metallplatte mit einem runden Loch in der Mitte befestigt, von dem auf dem Schirm ein Bild (ein weisser runder Fleck) entworfen wird. Bringen wir jetzt das doppeltbrechende Prisma in den Strahlengang, so sehen wir, wie es das

1) Dieses Kalkspathprisma ist so montirt, dass es beide Bilder auf dem Schirme entwirft. Es giebt verschiedene Methoden, ein solches Prisma zu construiren. Gewöhnlich combinirt man einen Keil aus Kalkspath mit einem entsprechenden Glaskeil. Das „ausserordentliche Büschel“ (dessen Schwingungen in Ebenen vor sich gehen, die parallel zur krystallographischen Achse verlaufen) geht gerade durch das „ordentliche“ Büschel und tritt schief aus, so ein Bild an anderer Stelle erzeugend. Besteht das Prisma aus zwei Krystallkeilen von verschiedenem Winkel, so ist das „ordentliche“ Bild das mittlere, um welches das ausserordentliche Bild rotirt.

Licht in zwei Theile zerlegt, indem es die eine Hälfte des Lichtes vom vorherigen Lichtfleck abtrennt, so ein zweites Bild erzeugend, welches das ursprüngliche theilweise überdeckt und dieselbe Gestalt wie dieses besitzt. Drehe ich das doppelbrechende Prisma, so bleibt das ursprüngliche „ordentliche“ Bild stehen, während das „ausserordentliche“ sich um dasselbe im Kreise herum bewegt (Fig. 76).

Um zu beweisen, dass beide Bilder polarisirt sind, bringe ich in den Strahlengang ein Nicolsches Prisma. Beim Drehen des Nicols bemerken Sie, wie zuerst das eine und nach weiterer Drehung das andere Bild ausgelöscht wird. Hat das Nicolsche Prisma eine Lage, bei der es nur die verticalen Schwingungen hindurchlässt, und wir drehen das doppelbrechende Prisma, so wird, falls die beiden Bilder wie in Fig. 77 vertical übereinander stehen, das ordentliche ausgelöscht, während das ausserordentliche hindurchgelassen wird. Beim Drehen des Nicols erscheint nach und nach das ordentliche wieder, während das ausserordentliche immer dunkler wird, bis bei einer Drehung um 90 Grad das ordentliche Bild hell erscheint, während das ausserordentliche ausgelöscht ist

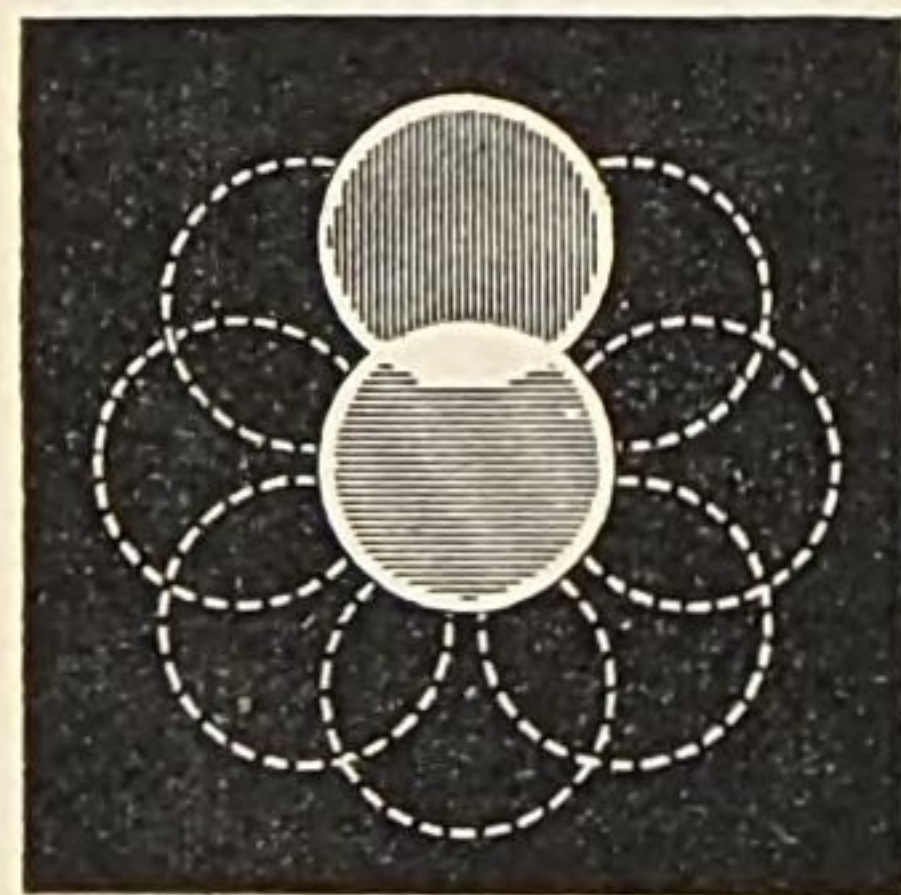


Fig. 76.



Fig. 77.



Fig. 78.



Fig. 79.

(Fig. 78). Bei einer Drehung des Nicols um nur 45 Grad aus der ursprünglichen Lage sind beide Bilder gleich hell, wobei die Richtung der Schwingungen durch die feinen Striche in der Fig. 79 angedeutet sind.

Nachdem wir so gesehen haben, dass der Doppelspath das Licht in zwei Büschel theilt, deren Schwingungen in verschiedenen und zwar zu einander senkrechten Richtungen stattfinden, bleibt uns blos noch übrig zu zeigen, wodurch diese Wirkung zu Stande kommt.

Die Zerlegung einer schiefen Bewegung in zwei Componenten von zu einander senkrechter Richtung ist ein wichtiges Princip, welches für unsere Zwecke am besten mit Hülfe eines Modells illustriert wird. Stellen wir uns eine Bewegung vor, welche schief zum Horizont vor sich geht; dieselbe kann stets in zwei Componenten zerlegt werden — eine, welche vertical auf- und abwärts gerichtet ist und eine zweite, welche die Richtung von rechts nach links besitzt. Das Modell ist auf einem Brett befestigt, in dessen Ecke ein kleines Diagramm aufgezeichnet ist. Geht die Bewegung schief vor sich längs AB , so können Sie diese Bewegung in zwei Theile, in den verticalen längs AV und in den horizontalen längs AH zerlegen.

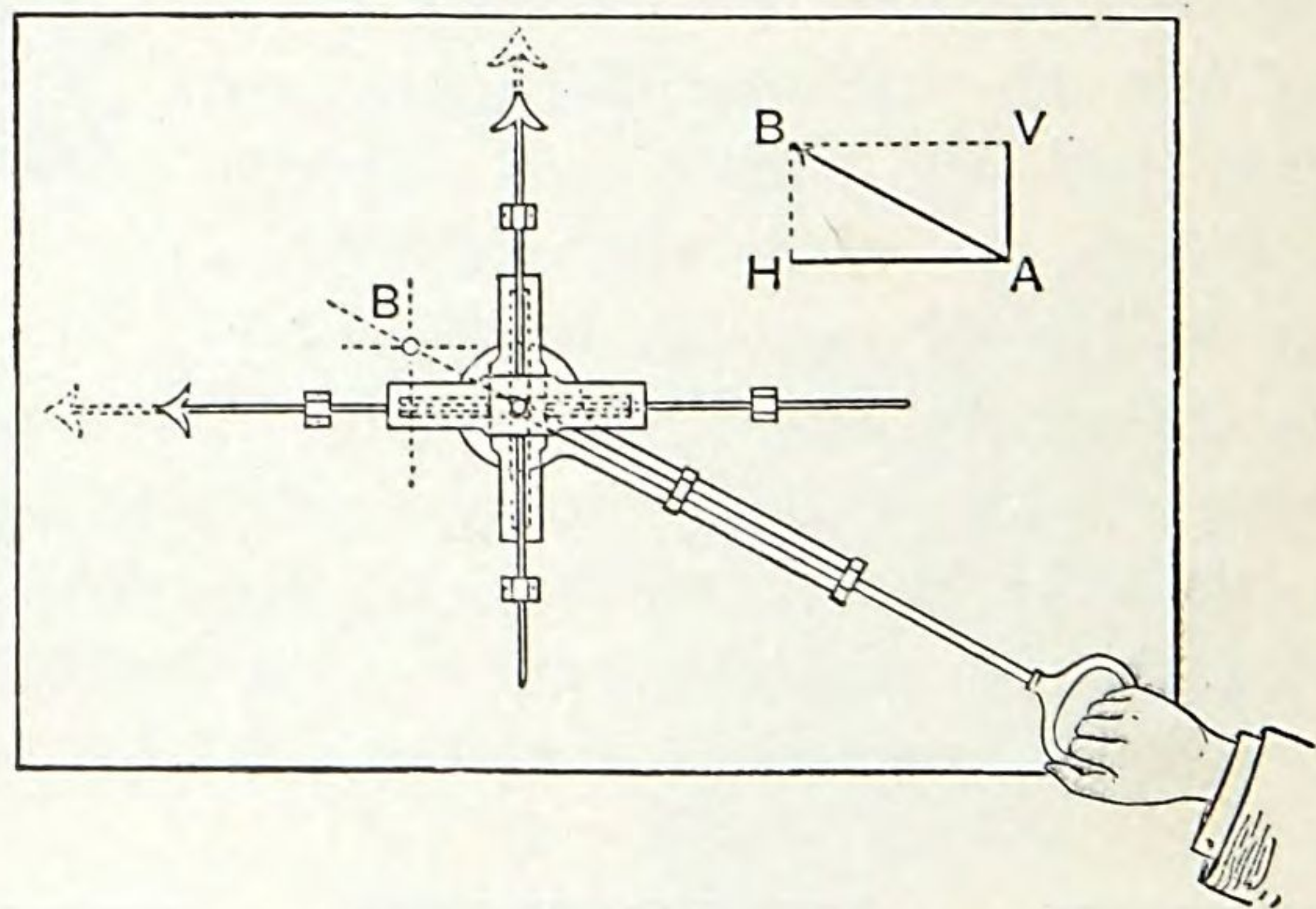


Fig. 80.

Jeder Schulknabe kennt das unter dem Namen „Parallelogramm der Kräfte“ bekannte Problem, dem zufolge sich zwei Kräfte, die an demselben Punkte angreifen, zu einer einzigen in Richtung der Diagonale des Oblongums zusammensetzen, dessen zwei Seiten die Grösse und Richtung der beiden Kräfte darstellen. Nun wohl, unser Problem ist gerade das umgekehrte hiervon. In meinem Modell sind zwei hölzerne mit Pfeilen versehene Schlitten. Der eine Schlitten kann sich nur auf- und abwärts, der andere dagegen nur von rechts nach links bewegen. Die in Rinnen laufenden Pfeile sind mittels Rollen am Ende eines dritten Holzstabes befestigt, welchem jede schiefe Lage gegeben und welcher hin- und hergezogen werden kann. Stelle ich nun diesen dritten Stab horizontal und bewege ihn mit der Hand, so ist die durch ihn erzeugte Bewegung lediglich eine horizontale — und es entsteht keine verticale Componente. Wenn ich ihn vertical richte und auf- und abwärts bewege, so schiebt er lediglich den verticalen Schieber auf- und abwärts.

Stelle ich denselben aber schief und bewege ihn, so bewirkt ein Theil seiner Bewegung eine solche des verticalen Schiebers, während die horizontale Componente seiner Bewegung eine solche des horizontalen Schiebers hervorbringt. Ein wie grosser Theil der Bewegung sich in die verticale Componente umsetzt und welcher Antheil in die horizontale, hängt lediglich von der Neigung ab, die ich dem dritten Schieber anfänglich ertheilt habe. Es giebt aber einen Winkel, bei welchem die resultirenden Bewegungen von gleicher Grösse werden. Welcher Winkel ist das? Nur wenn ich den die Bewegung hervorruhenden Schlitten genau 45 Grad gegen die beiden anderen Schieber neige, resultirt eine gleichgrosse Bewegung in verticaler und horizontaler Richtung. Sie erinnern sich, dass auch das doppelt brechende Prisma bei der 45 Grad-Stellung des Nicols zwei Bilder von genau gleich grosser Helligkeit erzeugte.

Eine solche Auflösung einer „schiefen“ Lichtwelle kann durch Krystalle, wie Isländischer Doppelspath, Quarz, Glimmer, Selenit und durch jeden anderen Krystall hervorgebracht werden, falls er die dazu erforderliche Structur besitzt. Die Bedingung hierfür ist einfach die, dass der Krystall in der einen Richtung eine grössere optische Elasticität oder „Steifigkeit“ (rigidity¹) aufweist, als in einer anderen Richtung. Sie wissen, was man meint, wenn man von der Faser im Holz spricht — wie viel leichter lässt es sich in Richtung der Faser spalten, als in der dazu senkrechten Richtung. Aber die faserige Structur des Holzes giebt sich noch auf eine andere Weise als durch die leichte Spaltbarkeit kund. Ein Holzstück ist z. B. längs der Faser schwerer zu biegen als in der dazu senkrechten Richtung.

Ebenso verhält es sich mit den Krystallen: sie besitzen eine unsichtbare Structur, ein Korn, so fein, dass wir die Structurfasern und Streifungen nicht erkennen können; aber das Korn selbst offenbart sich in mehrfacher Weise. Es sind Verschiedenheiten in der Leichtigkeit des Spaltens und auch Unterschiede in Bezug auf die „Steifigkeit“ in den verschiedenen Richtungen vorhanden.

1) Das Wort „Steifigkeit“ (rigidity) ist hier gewählt worden, obwohl in den meisten Büchern das Wort „Elasticität“ gebraucht wird. Würden wir sagen, der Krystall besitzt in verschiedenen Richtungen verschiedene „Elasticitäten“ — und dies wäre zweifellos richtig — so könnten viele Leser eine falsche Vorstellung gewinnen, und zwar weil das Wort „elastisch“ oft in anderer Bedeutung gebraucht wird. Elastisch bedeutet nicht, dass ein Object leicht gedehnt werden kann. Der härteste Hartstahl ist bei weitem elastischer, als ein Stück Gummi, und dennoch kaum dehnbar. Wenn wir ihm gleichwohl Elasticität zuschreiben, so wollen wir damit

Dieser specielle Krystall (Isländischer Doppelspath) hat in der einen Richtung eine grössere Steifigkeit als in der anderen, und spaltet in Folge dessen jede ihn schief durchsetzende Welle in zwei Theile, von denen der eine seine Schwingungen parallel zur Axe der grössten Steifigkeit (Elasticität) ausführt, während die Schwingungen des anderen Theiles parallel zur Axe der kleinsten Steifigkeit und darum senkrecht zur ersteren gerichtet sind.

Einige Krystalle, namentlich der Diamant und Granat, sind gleich elastisch in Bezug auf alle Richtungen, und darum zeigen diese keine Doppelbrechung und polarisiren das Licht auch nicht.

Ich benutze wiederum ein Modell, um die Theilung der Wellen zu illustriren. Zwei dünne biegsame Streifen von Ebonit *O* und *E* (Fig. 81) sind eingelassen in zwei in einen hölzernen Cylinder gesägte Einschnitte. In das andere Ende des Cylinders kann ich ein drittes Stück Ebonit *A* stecken. Bemerken Sie wohl, dass *O* mit seiner

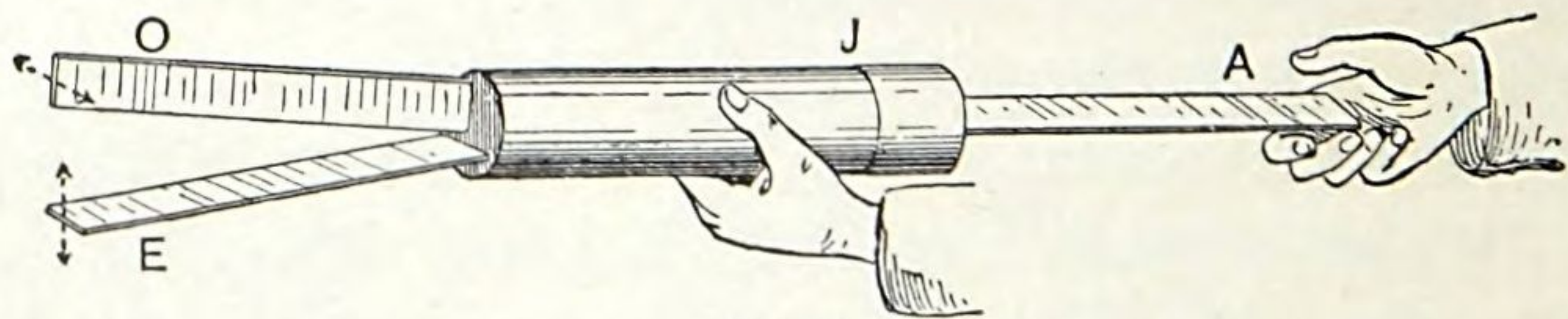


Fig. 81.

Kante vertical steht und nur Schwingungen von rechts nach links ausführen kann, während *E* horizontal liegt und nur von oben nach unten schwingen kann. Ich halte den hölzernen Cylinder in meiner linken Hand und gebe dem Streifen *A* am anderen Ende eine vibrirende Bewegung. Lasse ich *A* von rechts nach links vibriren, so schwingt auch *O* in gleicher Weise, während *E* in Ruhe verharrt.

ausdrücken, dass er, wie wenig wir ihn auch comprimiren oder dehnen können, beim Nachlassen der auf ihn einwirkenden Kräfte in seine frühere Lage zurückkehrt. In der Wissenschaft wird derjenige Körper als der elastischste angesehen, zu dessen Deformation die grösste Kraft gehört. Beschäftigen wir uns, wie in dem Falle transversaler Verschiebungen, mit Bewegungen, welche bestrebt sind das Medium zum Schwanken zu bringen (to shear), so ist die in Frage kommende „Elasticität“ jene, welche den Biegungen (shearing) widerstrebt, und für sie kann daher mit Recht der Ausdruck „Steifigkeit“ gebraucht werden. Hier beschäftigen wir uns immer mit der optischen, nicht mit der mechanischen Elasticität, d. h. also mit der Elasticität des Aethers innerhalb der Substanzen. Diese allein ist es, von der wir annehmen, dass sie in den Krystallen in einer Richtung grösser ist als in einer anderen. Je grösser aber diese Steifigkeit des Aethers ist, um so grösser ist die Fortpflanzungsgeschwindigkeit derjenigen Welle, deren Verschiebungen längs jener Richtung stattfinden.

Schnelle ich A auf- und abwärts, dann vibriert nur E auf- und abwärts, während O in absoluter Ruhe verharrt. Ertheile ich jetzt A eine zum Horizont schiefe¹⁾ Bewegung, so vibriren sowohl O als E , da die schiefe Bewegung in eine verticale und in eine horizontale Componente aufgelöst wird.

Zu den Lichtwellen selbst zurückkehrend, wollen wir einige Erscheinungen betrachten, welche eine Folge davon sind, dass die Schwingungen beim Durchgang durch einen Krystall in zwei Componenten zerlegt werden.

Vor die Laterne habe ich das grosse Nicolsche Prisma als Polarisator gesetzt und vor dieses einen kleineren Nicol als Analysator. Steht letzterer senkrecht zum ersteren, so erhalten wir ein

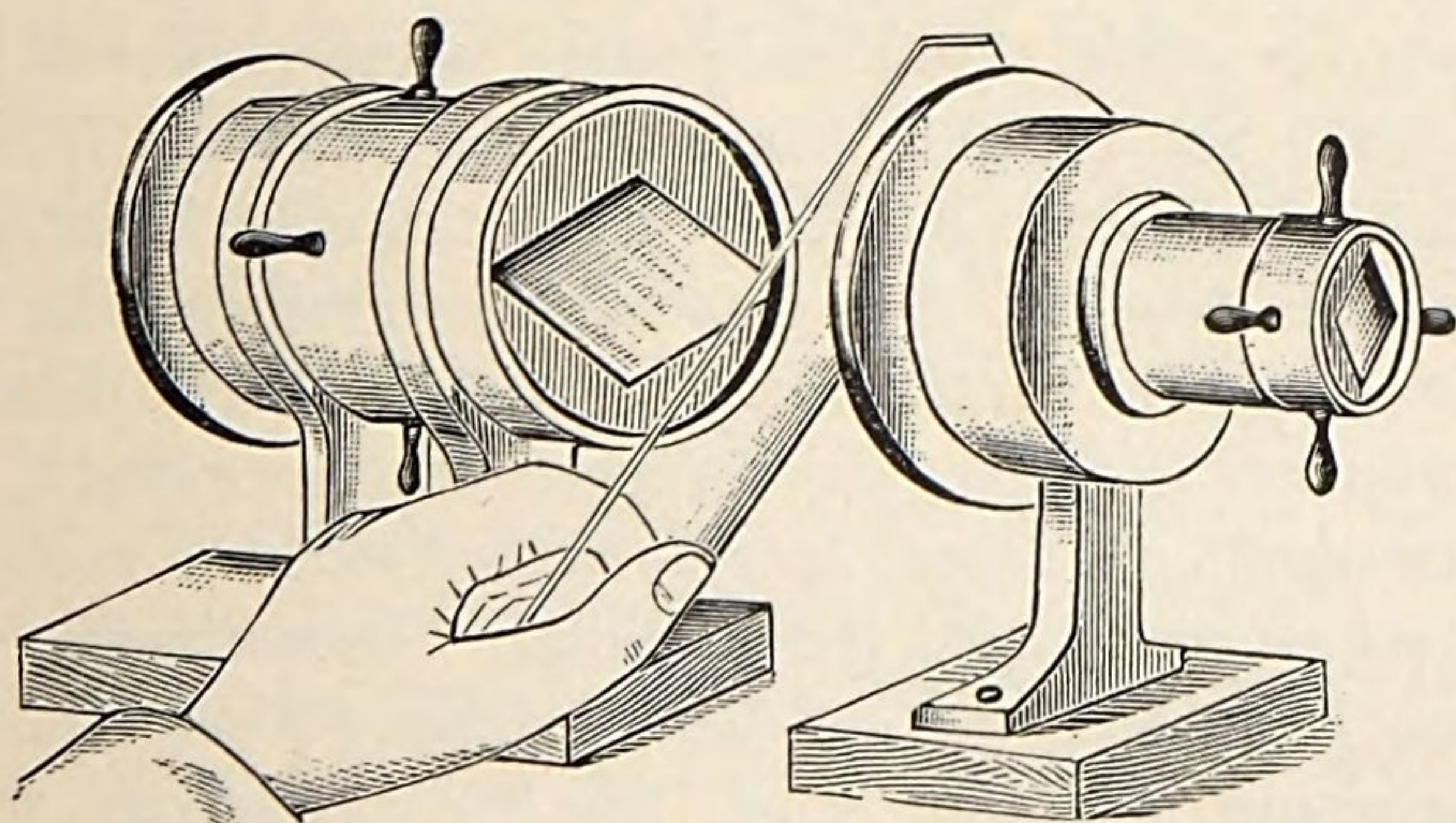


Fig. 82.

„dunkles Feld“ (Seite 76). Alles Licht, was durch den ersten Nicol geht, schwingt nämlich in verticaler Richtung, und da der zweite Nicol nur horizontale Schwingungen hindurchlässt, so kann unmöglich Licht durch beide Prismen auf den Schirm gelangen. Jetzt nehme ich ein Stück Glimmer und halte es zwischen die Nicolschen Prismen (Polarisator und Analysator), sodass seine Axe „schief“ steht. Sehen Sie, wie es das dunkle Feld aufhellt. In Tyndallscher Ausdrucksweise scheint es „die Dunkelheit hinwegzufegen“. Beachten Sie auch, welche wunderschönen Farben der Glimmer erzeugt, wiewohl die Glimmerplatte selbst ganz farblos ist. Woher dann dieses Licht und diese Farben? Nun wohl, das Licht ist leicht zu erklären. Der Krystall besitzt längs einer bestimmten Richtung eine grösste

1) Das Ende des Cylinders, an dem A befestigt ist, kann um einen Punkt J bewegt werden, insofern der Cylinder aus zwei in einander passenden Theilen gefertigt ist.

Steifigkeit — „eine Axe grösster Elasticität“, wie man zu sagen pflegt. Stellen wir die Platte so, dass die Krystallaxe schief zu den verticalen Schwingungen zu stehen kommt (Fig. 82 a. v. S.), dann werden diese in zwei Theile getheilt, von denen der eine parallel zur Axe der grössten Elasticität, der andere aber senkrecht dazu schwingt. Beide Wellenzüge in dem Krystall sind also schief gerichtet, d. h. ihre Schwingungen gehen weder vertical noch horizontal vor sich. Beide schreiten ausserdem mit verschiedener Geschwindigkeit in dem Krystall fort, in Folge dessen beim Wiederaustreten auf der anderen Seite der eine Wellenzug einen kleinen Vorsprung gegenüber dem anderen gewonnen hat. Demnach bringen die beiden Componenten durch ihr Zusammenwirken beim Austritt als Resultante nicht wieder verticale Schwingungen hervor. Die resultirenden Schwingungen können schief, kreisförmig oder selbst elliptisch sein; ihre wirkliche Natur und Richtung hängt von der Natur und Dicke der angewandten Krystallplatten und der Wellenlänge des benutzten Lichtes ab. Wesentlich dabei ist, dass die resultirende Schwingung beim Austritt nicht mehr in verticaler Richtung polarisirt ist. Durch die Krystallplatte sind die Schwingungen also so getheilt, verzögert und wieder vereinigt worden, dass sie beim Austritt in einer anderen Richtung schwingen als bei ihrem Eintritt. Dieses austretende Licht enthält also beim Auffallen auf den Analysator auch eine horizontale Componente und diese wird, wie Sie wissen und sehen, vom Analysator hindurchgelassen. Die Farben hängen von der Dicke der Platte ab, welche in diesem Falle nicht überall gleich gross ist, da die Platte mittels eines Taschenmessers aus dem Krystall ausgeschnitten worden ist. Die bisherige Platte bestand aus Glimmer. Hier habe ich eine Gypsplatte, ebenfalls mit dem Messer geschnitten; sie bringt ähnliche Wirkungen hervor. Und so giebt es noch eine grosse Anzahl anderer Krystalle, welche alle nahe gleiche Wirkungen hervorbringen.

Hier sind in einer kleinen Glasschale zwei Rubine. Setze ich sie vor den Polarisator und justire eine Linse so, dass von ihnen ein Bild auf dem Schirm entworfen wird, so sehen Sie, wie beide einander ähnlich sind. Der eine ist ein etwas zerkratzter echter Genueser; der andere ein unechter Rubin, ebenfalls ein wenig zerkratz. Welcher ist echt, und welcher ist unecht? Wir erhalten die Antwort auf diese Frage, wenn wir vor die Linse das zweite Nicolsche Prisma setzen. Drehen wir dieses in die richtige Lage, so erhalten wir ein „dunkles“ Feld, und in diesem Felde leuchtet der Edelstein,

während der unechte Stein dunkel bleibt. Der helleuchtende ist der echte Genueser Rubin, denn er allein besitzt eine Axe der grössten Elasticität.

Drehen wir langsam das Gefäss so, dass die Bilder beider Edelsteine sich um einander bewegen, so bleibt das eine immer dunkel, während das andere abwechselnd hell und dunkel wird. Es ist dunkel in der jetzigen Stellung, in welcher seine Axe der grössten Steifigkeit entweder vertical oder horizontal steht und erscheint am hellsten, wenn seine Axe unter 45 Grad gegen die Horizontale geneigt ist, bei welchem Winkel die Zerlegung in zwei gleich grosse Componenten am vollkommensten ist.

Nun bringen wir in unseren Apparat zwischen die beiden Nicols ein anderes Gefäss, welches mehrere ausgewählte Edelsteine, Granat, Topas, Smaragd, Saphir, Chrysoberill und in der Mitte einen kleinen Diamanten enthält. Justire ich den Analysator so, dass wir ein dunkles Feld erhalten und drehe langsam das Gefäss, so bemerken Sie, wie jeder Krystall aufleuchtet, wenn seine Axe der grössten „Elasticität“ eine Neigung von 45 Grad gegen den Horizont hat. Nur zwei sind darunter, welche nicht aufleuchten, das ist der Diamant und der Granat, Krystalle, welche zu dem „regulären“ System gehören, bei dem die Elasticität in allen Richtungen die gleiche ist.

Hier sind noch einige andere Objecte für unser Polariskop, Platten von Krystallen und Mineralien. Zuerst ein Stück Amethyst. Obgleich es bei gewöhnlichem Licht ganz klar und von bleicher purpurner Farbe ist, so zeigt eine Untersuchung in polarisirtem Licht, dass dieser Edelstein augenscheinlich aus einer ganzen Anzahl von übereinander liegenden getrennten Schichten besteht, welche abwechselnd dunkelpurpur und weiss leuchten. Dagegen zeigen andere Partien des Krystalls eine ganze Anzahl unerwarteter Farben, welche ausserdem beim Drehen des Analysators wechseln.

Hier habe ich eine dünne Platte von grauem, schottischen Granit. Die natürlichen Schattirungen sind schwarz und weiss, da er, wie Ihnen die Mineralogen bestätigen können, aus kleinen Krystallen durchsichtigen Quarzes und Feldspaths besteht, die mit schwarzen Glimmerstückchen durchmischt sind. Im polarisirten Licht untersucht, zeigen die Platten wundervollen Farbenglanz und offenbaren neue Einzelheiten der Structur.

Das nächste schöne Object ist eine dünne Scheibe aus Tropfstein, eine jener natürlichen Ablagerungen von Kalkspath, welche, den Eiszapfen ähnlich, von den Decken der Tropfsteinhöhlen her-

niederhängen. Die Ablagerung ist Schicht für Schicht, fast concentrisch, ohne weiteres zu sehen. Im Polariskop hingegen zeigt er ein merkwürdiges schwarzes Kreuz, welches sich beim Drehen des Analysators in ein weisses verwandelt. Dieses schwarze Kreuz tritt im dunklen Felde auf. Solche schwarzen Kreuze entstehen immer, wenn das Object in radialer und tangentialer Richtung verschiedene Elasticität besitzt. Die nächste Platte zeigt es noch deutlicher. Sie ist mit künstlichen Krystallen der Substanz „Salacine“ (Salicin?) bedeckt, welche in Alcohol aufgelöst werden kann. Giesst man diese Lösung auf eine gewärmte Glasplatte, so verdampft der Alcohol und die Substanz krystallisirt aus. Die Krystallisation geht gleich-

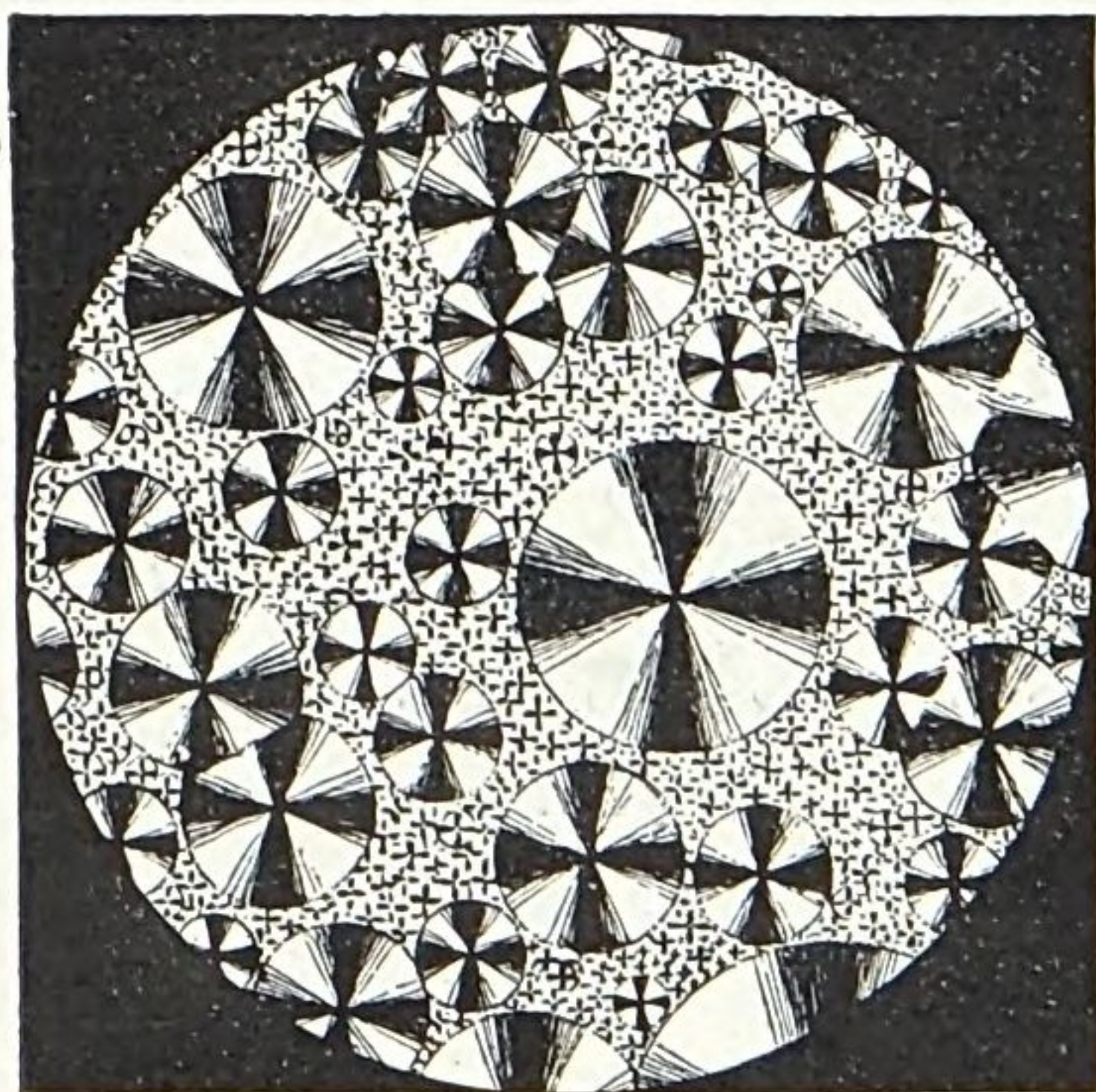


Fig. 83.

zeitig von verschiedenen Orten aus, um welche herum sich kleine Krystallgruppen bilden, die eine radiale Structur und eine kreisförmige Aussenlinie haben (Fig. 83). Da die Axen grösster Elasticität in jedem Gebilde alle radial zur Mitte gerichtet sind, so wird die maximale Aufhellung des Lichtes in jedem der kleinen Kreise unter 45 Grad nach rechts und links eintreten, während in verticaler und horizontaler Richtung das polarisirte einfallende Licht keine Zerlegung erfährt; letztere Rich-

tungen bleiben daher im „dunklen Felde“ ebenfalls dunkel und erzeugen das schwarze Kreuz. Dreht man den Analysator schnell um sich selbst, sodass das schwarze Kreuz in schneller Aufeinanderfolge in ein weisses und dieses wiederum in ein schwarzes verwandelt wird, so scheinen sich alle die schwarzen Kreuze in den verschiedenen Krystallgruppen zu drehen, wie die Flügel einer Windmühle.

Hier ist eine dünne Scheibe von Selenit, ganz unregelmässig abgesplittert und an verschiedenen Stellen verschieden dick. Ohne Analysator zeigt Selenit auf dem Schirm nichts Merkwürdiges; er ist klar wie Glas und ganz farblos. Benutzen wir aber den Analysator und stellen das dunkle Feld her, so entsteht mit einem Schlage ein prächtiges Farbenbild. An der einen Stelle ist die Dicke so, dass eine sehr schöne gelbe Färbung auftritt; gerade darüber, wo der Krystall ein wenig dicker ist, entsteht ein Fleck von glänzendem Purpur. Es sind das die Farben, welche in dem dunklen Felde

auftreten. Drehen wir den Analysator um 90 Grad, sodass das helle Feld entsteht, so verwandelt sich jede Farbe in ihre Complementärfarbe, Orange in Azurblau und Purpur in lebhaftes Grün.

Es bleibt mir jetzt noch übrig zu erklären, wie diese Farben zu Stande kommen. Bisher habe ich Ihnen nur gesagt, dass sie von der Dicke der Krystallplatte und von der Wellenlänge der verschiedenen Lichtarten abhängen. Da die Schwingungen auf ihrem Wege durch den Krystall in zwei Theile zerlegt werden, welche sich mit verschiedener Geschwindigkeit fortpflanzen, so muss nothwendig der eine gegenüber dem andern einen Vorsprung gewinnen. Derjenige, welcher längere Zeit zur Zurücklegung desselben Weges brauchte, hat beim Austreten im Vergleich zum andern einen Phasenverlust, d. h. eine scheinbare Wegdifferenz erlitten. Diese „Wegdifferenz“ in Folge der verschiedenen Fortpflanzungsgeschwindigkeit kann in einer dünnen Platte natürlich nur sehr gering sein; sie beträgt nur einen Theil der Wellenlänge und, falls die Platte dicker ist, höchstens einige Längen einer Welle. Die Frage, wie sich die beiden Theile bei ihrem Austritt aus der zweiten Fläche zusammen setzen, hängt wesentlich davon ab, wie viele Wellenlängen Wegunterschied die beiden Antheile besitzen. Demnach ist also die Wirkung abhängig von der Art des Lichtes und der Dicke der Platte. Bewirkt z. B. eine Glimmerplatte von rund 0,032 mm Dicke, dass die gelben Wellen genau $\frac{1}{4}$ Wellenlänge Wegdifferenz erleiden, dann folgt nothwendig, dass eine doppelt so dicke Platte einen doppelt so grossen Wegunterschied hervorbringt und beiden Antheilen einen Phasenunterschied von einer halben Wellenlänge ertheilt. Weiter folgt, dass, wenn die Plattendicke den gelben Wellen genau eine Wegdifferenz von einer halben Wellenlänge ertheilt, sie den rothen Wellen eine kleinere, den blauen und violetten aber eine grössere Phasendifferenz ertheilt. Die Folge davon aber ist, dass sich die Wellen nach dem Durchgange durch eine Krystallplatte von bestimmter Dicke je nach ihrer Grösse zu einer Schwingung von anderer Richtung zusammensetzen. Die Schwingungsrichtung ist somit eine Funktion der Wellenlänge. Ist z. B. die Dicke der Krystallplatte eine solche, dass die grünen Wellen bei ihrem Austritt in verticaler Richtung schwingen, dann wird bei dieser Dicke das grüne Licht im dunklen Feld vollständig ausgelöscht sein, das übrige Farbgemisch aber nicht, während letzteres im hellen Feld geschwächt wird, wo Grün vollständig hindurchgeht. Auf diese Weise erhalten wir die Complementärbeziehung zwischen den Farben in beiden Lagen des Analysators.

Die Aufeinanderfolge der Farben bei einem regelmässigen Anwachsen der Dicke eines Krystalls ist dieselbe wie bei den Newtonschen „Farben dünner Blättchen“. Sir Isaac Newton untersuchte die Farben der Seifenblasen und anderer dünnen Blättchen und bestimmte ihre Beziehung zur Dicke der Lamelle, indem er auf geniale Art eine Luftschicht von continuirlich ansteigender Dicke

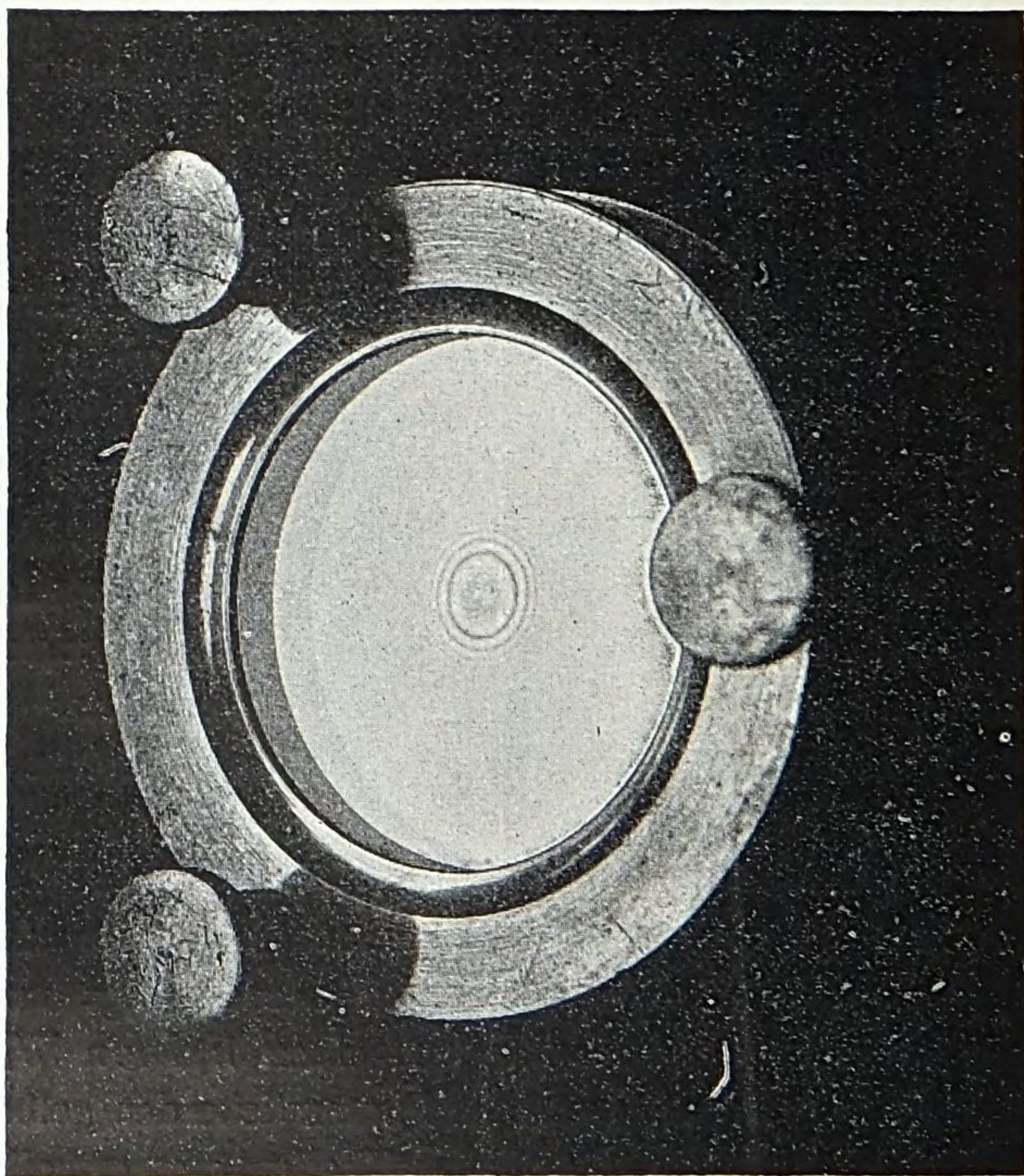


Fig. 84.

zwischen zwei Gläsern herstellte, von denen das eine eben, das andere sehr wenig gekrümmt ist (Fig. 84).

Ich entwerfe jetzt auf dem Schirm das System der Newtonschen Farbenringe. Wo sich die beiden Gläser berühren, da sehen Sie einen dunklen Fleck; um diesen runden schwarzen Fleck breiten sich die Farbenringe der verschiedenen „Ordnungen“ aus. Die Farben finden Sie in beifolgender Tabelle verzeichnet.¹⁾ Diejenigen

1) Anmerkung des Uebersetzers: Diese Tabelle ist der bekannten Tabellen-Sammlung von Landolt und Börnstein (Berlin 1894, S. 150) entnommen. Es

der ersten Ordnung, welche mit Schwarz beginnen, sind sehr schwach und endigen mit einem dunklen Purpurroth oder der sogenannten „Uebergangsfarbe“; auf diese folgen die Farben der zweiten Ordnung,

Die Farbenfolge bei den Newtonschen Farben dünner Blättchen:

Ordnung	Dicke der Schichten in Milliontel mm	Farbe im reflectirten Licht
I	Null	Schwarz.
	107	Lavendelgrau.
	129	Grünlich weiss.
	140	Blass strohgelb.
	164	Braungelb.
	235	Orange.
	245	Roth.
II	257	Purpur.
	282	Indigo.
	352	Himmelblau.
	387	Hell Grün.
	435	Gelb.
	490	Roth.
III	520	Purpur.
	570	Blau.
	650	Grün.
	700	Gelbgrün.
	750	Roth.
IV	780	Purpur.
	852	Graublau.
	912	Grün.
	996	Grauroth, Roth, Mattroth.
V	1168	Blaugrün.
	1264	Fleischroth.

Bei den höheren Ordnungen wechseln Blaugrün und Rosa mit einander ab.

welche nahezu identisch mit den Farben des Spectrums sind, nur dass das Grün nicht gesättigt auftritt. Am Schluss der zweiten

werde gleichzeitig darauf aufmerksam gemacht, dass in dieser Tabelle abweichend vom Text die purpurne Uebergangsfarbe nicht am Ende einer Ordnung, sondern stets zu Anfang der nächstfolgenden Ordnung steht.

Ordnung ist wieder die purpurne „Uebergangsfarbe“, auf welche die Farben der dritten Ordnung mit einem schönen Grün aber mit schlechtem Gelb (Gelbgrün) folgen. An die dritte Ordnung reiht sich die vierte mit blässeren Farben, unter denen Grün und Roth vorherrschen; ihr schliesst sich eine noch farbenärmere fünfte an, gefolgt von noch höheren Ordnungen mit sehr schwachen und bleichen Farben. Die entsprechenden Dicken der Luftschicht sind in Millionteln des Millimeters angegeben.

Um die entsprechenden Farben mit Hülfe dünner Krystallplatten von Selenit hervorzubringen, braucht man sehr viel grössere Dicken, als sie die Luftschicht beim Newtonschen Farbenglas besitzt, weil ja im Polariscop die Farbenerscheinung der Differenz der Geschwindigkeiten zu verdanken ist, mit welcher die beiderlei Schwingungen sich in dem Krystall fortpflanzen. Um im Krystall die Wegdifferenz von $\frac{1}{4}$ Wellenlänge und dementsprechend dieselbe weissliche Färbung zu erzeugen, welche eine Luftschicht von etwa 140 Millionteln eines Millimeters hervorbringt, müssen wir ein Selenitblättchen von nahe $\frac{1}{400}$ Millimeter Dicke anwenden. Die auf diese Weise hervorgebrachten Farben sind nicht ganz identisch mit den Farben dünner Luftblättchen, und zwar in Folge der im Selenit stattfindenden Farbenzerstreuung.

Der Grund für diese besondere Farbenfolge entspringt aus der Uebereinanderlagerung der verschiedenen Ordnungen für die Wellen verschiedener Grösse. Beim Newtonschen Farbenglas entstehen die Farben dadurch, dass die an der oberen und unteren Fläche der Luftschicht zwischen den beiden Gläsern reflectirten Lichtstrahlen mit einander interferiren. In einer gewissen Entfernung von der Mitte, wo sich die Gläser berühren, ist z. B. die Dicke gerade so gross, dass das Licht, welches an der untern Fläche reflectirt worden ist, genau eine halbe Wellenlänge mehr zurücklegt, als das Licht, welches an der oberen Fläche reflectirt wird. An dieser Stelle, an der die Luftschicht die Dicke von genau $\frac{1}{4}$ Wellenlänge einer Lichtart beträgt, würde das Licht dieser Art gerade vollständig durch Interferenz ausgelöscht. Für gelbes Licht, von dessen Wellen etwa 559 Millionen auf ein Millimeter gehen, tritt dieser Fall ein, wenn die Luftschicht die Dicke von etwa 140 Milliontel eines Millimeters beträgt.

Nun haben aber durch Reflexion am Newtonschen Glase von Anbeginn an alle Wellen eo ipso $\frac{1}{2}$ Wellenlänge verloren, wie man ja aus der Dunkelheit des schwarzen Flecks in der Mitte ansehen

kann, wo die Dicke Null ist und sich dennoch die beiden Strahlenantheile durch Interferenz vernichten. Demnach müssen sich die gelben Wellen da, wo die Luftschicht gleich der Dicke einer halben Wellenlänge des gelben Lichtes ist, verstärken; das heisst in einer Distanz vom Centrum, an der die Luftschicht gerade 140 Milliontel Millimeter dick ist, tritt das gelbe Licht am hellsten auf. Dasselbst entsteht ein heller gelber Kreis, derjenige der ersten Ordnung des gelben

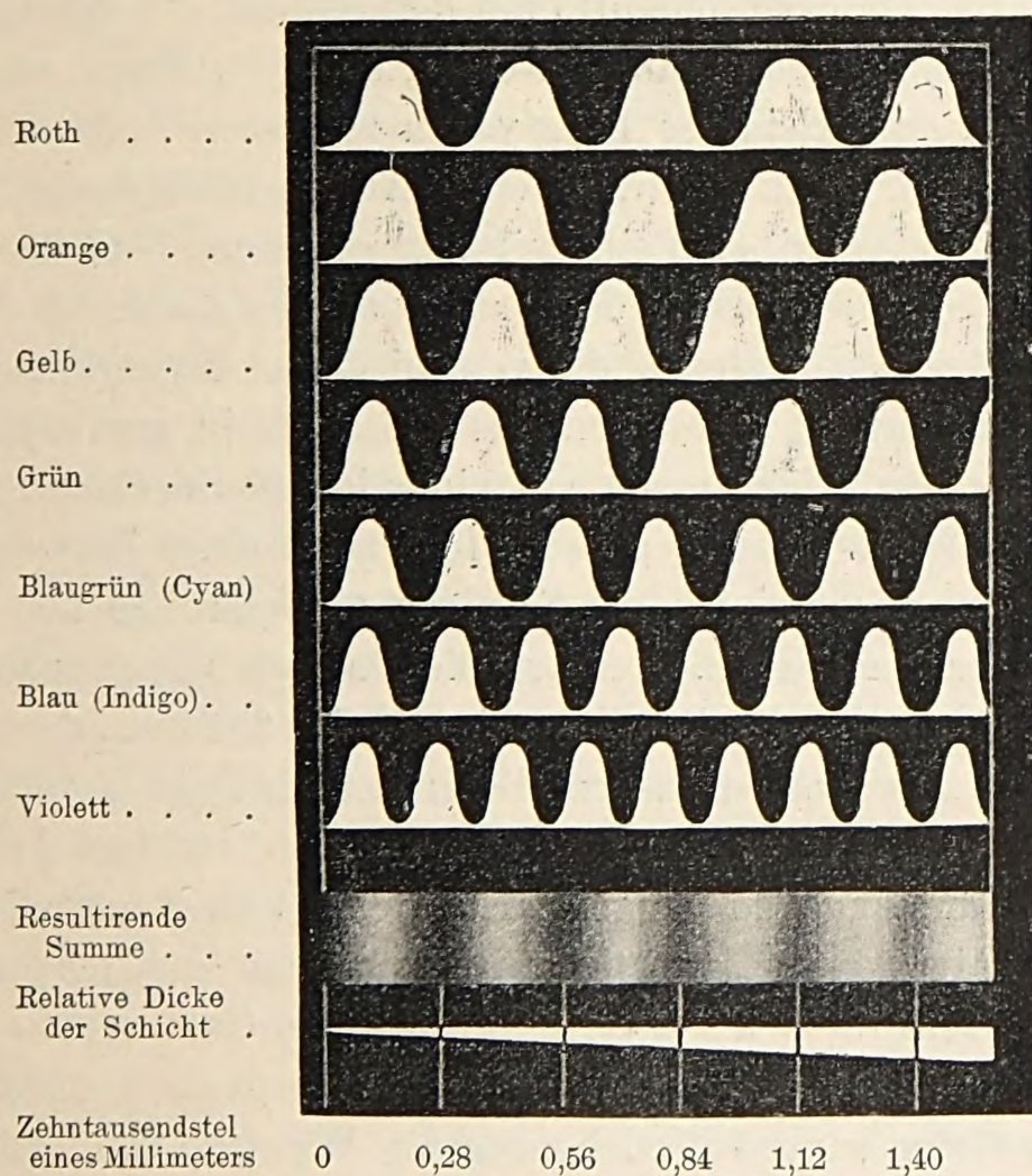


Fig. 85.

Lichtes. Da nun die rothen Wellen 686 Milliontel eines Millimeters lang sind, so entsteht der rothe Ring erster Ordnung an der Stelle, wo die Luftschicht etwa 172 Milliontel Millimeter beträgt. Die Farbenringe beim Newtonschen Farbenglas haben also verschieden grosse Durchmesser für Licht verschiedener Wellenlänge, d. h. für verschiedene Farben; da weisses Licht eine Zusammensetzung aller Farben ist, so entsteht schliesslich Weiss da, wo sich die Farbenringe aller Farben übereinander lagern.

Dieser Vorgang wird Ihnen verständlich werden, wenn Sie folgende Zeichnung betrachten (Fig. 85), in welcher die verschiedenen Gestalten der Wellen neben einander dargestellt sind. Darin be-

deutet die Distanz in horizontaler Richtung von links nach rechts die Entfernung vom Centrum des Newtonschen Ringsystems, wobei angenommen ist, dass sich die Dicke der Luftschicht direct proportional dem Radius der Ringe ändere.

Fiele nur rothes Licht auf das Farbenglas, so entstände ein Ringsystem von abwechselnd hellen rothen und schwarzen Kreisen mit einem schwarzen Centrum und die Distanz der aufeinander folgenden Ringe vom Centrum correspondirte mit den Stellen, wo die Kämme der rothen Wellen am höchsten sind. Aehnlich würde, wenn nur gelbes Licht auffiele, ein kleineres Ringsystem entstehen von abwechselnd gelben und dunklen Kreisen, in einer Aufeinanderfolge, wie es die weissen Kämme der dritten Reihe veranschaulichen. Und so weiter für die anderen skizzirten Farben. Fällt also weisses Licht aufs Newtonsche Farbenglas, so entstehen die verschiedenen Ringsysteme für die verschiedenen Farben, aus denen das weisse Licht gemischt ist, alle gleichzeitig, in Folge dessen sie einander überdecken und so zu Mischfarben Veranlassung geben. In irgend einer Entfernung vom Centrum ist das Licht gleich der Summe aller Beträge der dort auftretenden einzelnen Farben. Nehmen Sie die verschiedenen Reihen der Fig. 85 und behandeln Sie dieselben wie additive Grössen, deren Summe wir unten hin zu schreiben hätten. Beginnen wir links, so erhalten wir die Summe Null, weil nichts zu summiren ist, insofern ja dort alle Kämme erst anfangen zu steigen. Ein wenig weiter und alle Kämme sind schon ein wenig angestiegen, Violett am meisten, Roth am wenigsten. Betrachten wir die Entfernung, wo Gelb seinen höchsten Punkt erreicht hat. Denken Sie sich eine verticale Linie durch die Kuppe der ersten gelben Welle gezogen. Wie viel von den anderen Lichtarten ist auf dieser Linie vorhanden? Dasselbst ist ein grosser Theil von Orange, aber wenig von Roth; ferner ein grosser Theil von Grün beziehentlich Blaugrün, aber nur etwas von Blau und sehr wenig von Violett. Addiren Sie schliesslich alle zusammen, so erhalten Sie also nahezu Weiss, freilich ein gelbliches Weiss, in Folge Vorherrschens von Gelb. Die Folge davon wird demnach sein, dass in der betrachteten Entfernung vom Centrum ein gelblich weisser Ring entsteht; die Luftschicht an dieser Stelle beträgt ungefähr 140 Milliontel Millimeter.

Jetzt betrachten Sie eine doppelt so grosse Entfernung vom Centrum, d. h. die Stelle am Ende der ersten gelben Welle, wo die Luftschicht ungerähr 280 Milliontel Millimeter beträgt. Dort ist kein Gelb vorhanden, aber ein wenig Orange und Roth; dort ist auch

kein Grün und kein Blaugrün vorhanden, sondern nur ein wenig Blau und Violett. Fügen Sie diese Farben zusammen, so erhalten Sie ein dunkles Purpur, welches in dem Diagramm (Fig. 85) am Ende der gelben Welle (0,28) als resultirende Summe zu setzen wäre.

Gehen wir zurück zur Newtonschen Farbentafel, so sehen wir, dass die Farben sich einreihen in regelmässige Ordnungen mit Purpur als Uebergangsfarbe zwischen den Farben der ersten und zweiten Ordnung, wo die Luftschicht 256 Milliontel Millimeter dick ist, mit Purpur am Ende der zweiten bzw. Anfang der dritten Ordnung, wo die Dicke 520 Milliontel Millimeter beträgt und zum drittenmal Purpur am Anfang der vierten Ordnung, wo die Luftschicht eine Dicke von 780 Milliontel Millimeter hat. Thatsächlich entsprechen diese dunkelsten Stellen einer Dicke der Luftschicht, bei der das gelbe Licht durch Interferenz ausgelöscht wird.

Diese Newtonschen Farben, erzeugt durch Interferenz und Ueberlagerung der verschiedenen Maxima, sind nun im allgemeinen identisch mit den Farben, welche im Polariskop durch Einführung dünner Krystallplatten entstehen. Der Grund, weshalb die dünnen Krystallplatten im polarisirten Licht nahe dieselben Farben hervorbringen, ist der folgende:

Stellen Sie sich vor, es falle das polarisirte Licht auf eine dünne Krystallplatte, deren Axe „schief“ zur Schwingungsrichtung steht d. h. mit ihr einen Winkel einschliesst. Dann werden die Schwingungen, wie ich Ihnen vorher auseinander gesetzt habe, in zwei Theile zerlegt, von denen der eine parallel zur Axe und der andere senkrecht dazu schwingt; ausserdem durchlaufen sie den Krystall nicht in derselben Zeit, weil die Elasticität in beiden Richtungen eine verschiedene ist. Und schliesslich treten in Folge der verschiedenen Grösse der Wellenlänge die Wellen der verschiedenen Farben, obgleich sie ganz die gleichen Plattendicken durchsetzt haben, doch in verschiedenem Zustand d. h. mit einer gewissen Phasendifferenz aus dem Krystall heraus. Zwei Componenten einer Welle von irgend einer Farbe werden sich also beim Austritt zu einer Schwingung in einer neuen Richtung zusammensetzen, und diese resultirende Richtung wird, gleichviel ob sie geradlinig oder elliptisch ist, für die verschiedenen Farben verschieden sein. Daraus folgt, dass der Analysator von einer Farbe mehr abblendet oder auslöscht als von der anderen, wobei das aus dem Analysator austretende Licht gleich der Summe aller dieser einzeln hindurchgelassenen Antheile der verschiedenen Farben ist.

Ist z. B. die Dicke des Krystalls eine solche, dass das gelbe austretende Licht sich zu einer nahe verticalen Schwingung zusammensetzt, dann schneidet der horizontal gestellte Analysator alles gelbe Licht ab und die Resultante des durchgelassenen Lichtes ist gleich der Summe aller anderen nicht vollständig ausgelöschten Farben, d. h. ein Dunkel-Violett. Hängen die resultirenden Farben beim Newtonschen Farbenglas von der Dicke der Luftschicht zwischen den beiden Gläsern ab, so sind ganz analog die Farben einer Krystallplatte im Polariskop von der Dicke der Krystallplatte abhängig.

Ich zeige Ihnen jetzt eine Selenit-Platte, welche an dem einen Ende ausserordentlich dünn ist und nach dem anderen Ende zu dicker wird, also die Form eines dünnen Keils hat. Derselbe zeigt in herrlichster Farbenpracht die Newtonschen Farben bis zur dritten Ordnung. Er möge uns als Normale bei der Untersuchung anderer Platten dienen. Dazu bringe ich jetzt zwischen die Nicolschen Prismen ein überall gleich dickes Stück eines Krystalls. Es zeigt im dunklen Felde das Roth zweiter Ordnung. Daraus schliesse ich mit Recht, dass dieser Krystall genau die gleiche Dicke hat, welche der Keil an jener Stelle besitzt, an welcher er dieselbe rothe Farbe zeigt. Das Roth verwandelt sich in lebhaftes Grün, wenn ich den Analysator drehe, sodass das helle Feld entsteht. Und so zeigt eine Krystallplatte, welche im dunklen Felde Violett der zweiten Ordnung giebt, im hellen Felde die complementäre rosenrothe Färbung.

Ich nehme jetzt zwei geeignet geschnittene Glimmerplatten, welche ich Ihnen erst einzeln und dann zusammen vorführen will. Die eine zeigt Blau der zweiten Ordnung, welche Farbe laut Tafel auf S. 91 durch eine Luftschicht von etwa 330 Milliontel Millimeter hervorgebracht wird. Die andere zeigt Gelb zweiter Ordnung, correspondirend mit einer Luftschicht von etwa 457 Milliontel Millimeter. Nun rathen Sie, was entsteht, wenn ich beide gleichzeitig in den Apparat bringe. Wird Blau und Gelb Weiss geben? Keineswegs! Beide zusammengelegt und mit ihren Axen unter 45 Grad nach rechts gegen die Verticale geneigt, haben denselben Effect, wie eine einzige Platte von der Dicke beider zusammen genommen, d. h. sie wirken wie eine Luftschicht im Newtonschen Farbenglas von 787 Milliontel Millimeter Dicke und geben eine purpurrothe Farbe.

Mein Assistent schiebt jetzt die eine Platte theilweise über die andere (Fig. 86) und Sie sehen in der That das überraschende, wenn auch vorausgesagte Resultat, dass Blau und Gelb zusammen purpurnes Rosenroth geben.

Lassen Sie uns jetzt die eine Platte so drehen, dass ihre Axe 45 Grad nach links zu stehen kommt, so dass sie subtractiv wirkt und dasselbe Resultat giebt, als ob wir die eine Dicke von der andern abgezogen hätten. Welche Farbe erhalten wir jetzt? Ziehen Sie bitte 330 Milliontel (Blau) von 457 Milliontel (Gelb) ab und Sie erhalten zur Antwort, dass dieselbe Farbe auftreten muss, welche eine Luftschicht von 127 Milliontel Millimeter gibt, d. h. ein weissliches Grau. Ueberzeugen Sie sich selbst, dass dort, wo der blaue subtractiv wirkende Krystall den gelben theilweise bedeckt, die resultirende Farbe in der That ein weissliches Grau ist.

Ich zeige Ihnen jetzt eine Keil-Combination aus 24 sehr dünnen Glimmerplatten, von denen jede folgende Platte die vorhergehende theilweise überdeckt, sodass ein „stufenförmiger“ Keil entsteht. Wir erhalten wie beim dünnen Selenitkeil die Newtonschen Farben der drei ersten Ordnungen; in diesem Falle freilich nicht allmählich in einander übergehende Farbtöne, sondern plötzliche Aenderungen der Farbe einer Dicke zur Farbe der nächstfolgenden Dicke. Wo diese Combination eine dem Weiss am nächsten kommende Mischfarbe aufweist, nämlich in der Mitte der Farben erster Ordnung, entspricht sie einer Luftschicht von der Dicke gleich einer halben Wellenlänge des gelben Lichtes. Ein wie diese Luftschicht wirkender Krystall wird „ $\frac{1}{2}$ -Wellenlängen-Blättchen“ genannt.

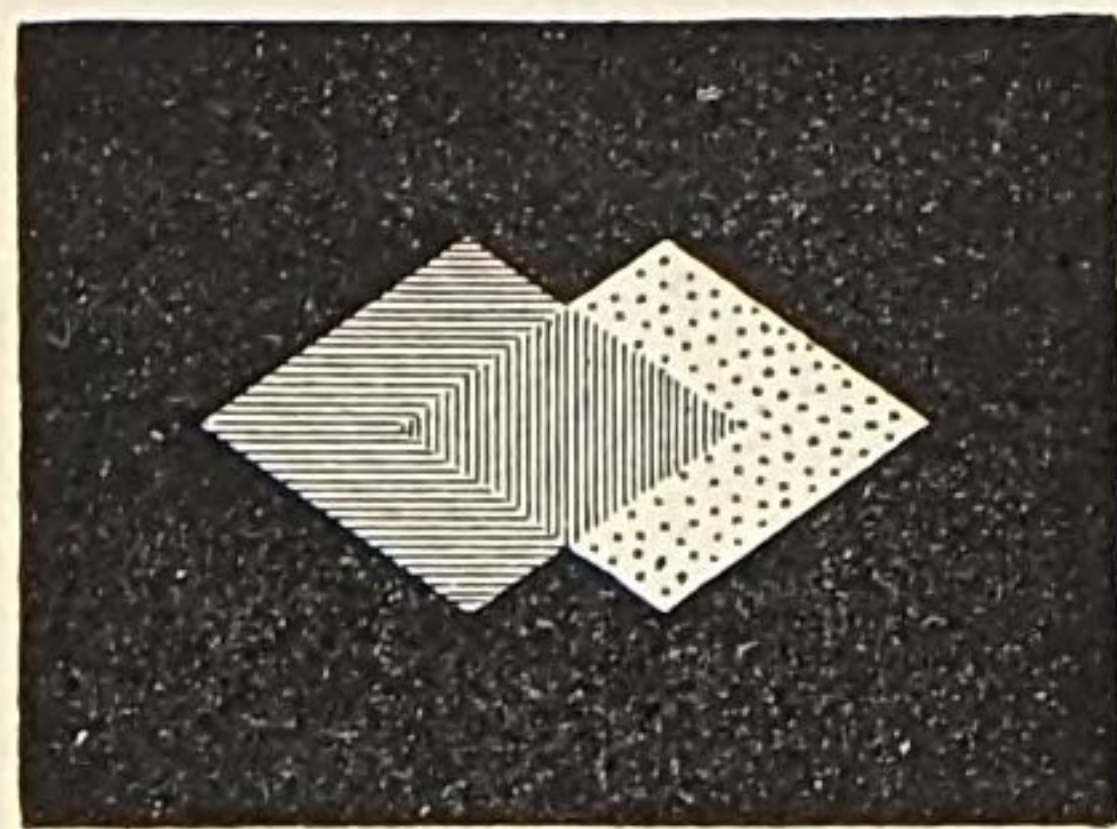


Fig. 86.

Halte ich einen solchen Krystall mit seiner Axe unter 45 Grad geneigt hinter eine der anderen Krystallplatten in das Polariskop, so sehen Sie, wie er alle Farben in ihre Complementärfarben umwandelt.¹⁾ Das Weiss im dunklen Felde wird im hellen Felde fast Schwarz — beziehentlich ein sehr tiefes Purpur.

Die nächste Platte, welche ich in das Polariskop bringe, dient zur Illustration dieses Princips. Im dunklen Felde sehen Sie einen weissen Schwan, welcher sich beim Drehen des Analysators zum hellen Felde in einen schwarzen Schwan verwandelt. Der Raum zwischen den Aussenlinien des Schwans und den Begrenzungen der

1) Es findet dies nicht ganz genau statt, da die Dicke einer halben Wellenlängen-Platte für die verschiedenén Farben eine etwas andere ist. Unsere Platte ist für die hellste Farbe (Gelb bezw. Gelbgrün) genau geschnitten.

Platte ist bedeckt mit einer halben Wellenlängen-Platte aus Selenit. Ich besitze eine andere Platte, in welcher ein Bäckerjunge mit einem Mehlsack auf dem Rücken dargestellt ist; derselbe verwandelt sich demnach beim Drehen des Analysators in einen Kaminkehrer, der statt des Mehlsacks einen Sack Russ auf dem Rücken schleppt.

Eine Krystallplatte von nur halb so grosser Dicke wie die der halben Wellenlängen-Platte nennt man $\frac{1}{4}$ -Wellenlängen-Blättchen. Es erzeugt zwischen den beiden Componenten für gelbes Licht eine Verzögerung von einer $\frac{1}{4}$ Wellenlänge.¹⁾

Hier ist ein anderes schönes Experiment. Eine dünne Platte von Selenit ist so geschliffen worden, dass sie auf einer Fläche gleich einer Concavlinse hohl ist, also in der Mitte eine geringere Dicke hat als an den Rändern. Sie zeigt die Newtonschen Ringe schöner als die dünne Luftschicht im Newtonschen Farbenglas sie jemals zeigen kann.

Schliesslich habe ich hier noch einige Objecte von grosser Schönheit. Einen aus Selenit geschnittenen Schmetterling; desgleichen ein Stiefmütterchen und hier eine Gänseblume, welche blassgelb im dunklen Felde, sich im hellen Felde purpur färben.

Natürliche Krystallmuster, die man dadurch erhält, dass man eine krystallinische Lösung auf eine Glasplatte ausgiesst und trocknen lässt, bilden Objecte von grosser Schönheit. Hier ist z. B. eine Platte aus einer Antipyrinlösung präparirt. Sie bringt eine Wirkung hervor ähnlich dem Frost auf einer Fensterscheibe. In dem Polariskop aber zeigen diese feinen federartigen Zweige, wie Sie sehen, das glänzendste Farbenspiel. Hier sind noch einige Krystalle von Kupfersulfat und Pyrogallussäure, welche nicht weniger merkwürdig sind.

In der Natur giebt es ausser den Krystallen noch andere Substanzen, welche in verschiedenen Richtungen eine verschiedene Elasticität besitzen. Dünne Platten, z. B. von Holz, Knochen und Horn und noch viele andere animalische und vegetabilische Structuren gehören dahin. Hier habe ich eine dünne Hornplatte, welche fast durchsichtig und farblos ist. Bringen wir sie aber in das Polariskop mit der Faser unter 45 Grad gegen die Verticale geneigt, so erzeugt sie ebenfalls bemerkenswerthe Farbenstreifen. Hier wieder sehen Sie

1) Die $\frac{1}{4}$ Wellenlängen-Platte bringt bei geeigneter Stellung (unter 45 Grad gegen die Axe), in der die Componenten gleiche Intensität haben, circular polarisirtes Licht hervor. Dann kommt bei jeder Lage des Analysators fast gleich viel Licht hindurch, sodass überhaupt kein „dunkles“ Feld auftritt.

einen Federkiel geglättet und als polariskopisches Object montirt. Er ist in der That glanzvoll in seinen Farben.

Ein weiteres sehr interessantes Object ist die natürliche Augenlinse eines Stockfisches. Da es eine faserige und eine radiale Structur hat, so zeigt es ein schwarzes Kreuz im dunklen Feld.

Glas ist unter gewöhnlichen Umständen frei von jeder Elasticitätsverschiedenheit in verschiedenen Richtungen.

Nichts destoweniger erzeugt die ungleichmässige Ausdehnung seiner verschiedenen Theile, wenn man es an einer Stelle plötzlich erhitzt oder abkühlt, Differenzen der Elasticität, welche sich im Polariskop bemerkbar machen. Hier z. B. habe ich eine kleine viereckige Glasplatte, welche im Polariskop weder eine Färbung noch irgend einen anderen Effect hervorbringt. Drücke ich sie aber in einen erhitzten Messingrahmen, welcher plötzlich nur die Kanten der Platte erwärmt und eine Ausdehnung der benachbarten Theile verursacht, ehe noch die Mitte Zeit hat, der Ausdehnung zu folgen, so wird ihre Structur ungleichem Druck ausgesetzt, und die in Folge dessen eintretenden Spannungen offenbaren sich in merkwürdigen Farbenmustern, welche Sie jetzt auf dem Schirm immer mehr und mehr anwachsen sehen.

Kühlt man ein heisses Glasstück plötzlich ab, sodass die äusseren Theile kalt werden und sich zusammenziehen, ehe die inneren Zeit gehabt haben, der Abkühlung zu folgen, so kann es den Zustand der Spannung für immer behalten. Ein solches „schlecht gekühltes“ Glas hat die Fähigkeit, mit fast explosiver Heftigkeit zu zerspringen.¹⁾ Hier ist ein viereckiges Glasstück, welches an sich keine Farbe besitzt, aber plötzlich gekühlt ist. Sein Zustand dauernder Spannung ist ohne Weiteres durch die sonderbaren Muster und die wenn auch matten Farben zu erkennen, die sich um ein etwas verzerrtes Kreuz zu bilden scheinen, welches sich vom Centrum aus verbreitet. Ein zweites Stück Glas, welches noch schneller abgekühlt ist, als das erste, zeigt dasselbe schwarze Kreuz (Fig. 87), während die Farben in den Ecken mehr den Farben der zweiten Ordnung ähneln. Hier wiederum habe ich einen Glascylinder, welcher auf seiner ganzen Oberfläche schnell abgekühlt worden ist. Die äussere Ober-

1) Der extreme Fall ist in den „Bologneser Tropfen“ verwirklicht, welche aus Glas bestehen und durch Eintauchen in Wasser plötzlich von hoher Temperatur auf Zimmertemperatur abgekühlt sind. Taucht man sie in ein kleines mit Oel gefülltes Gefäss, um die oberflächlichen Reflexe zu beseitigen und prüft sie im polarisirten Licht, so zeigen sie brillante Farben.

fläche hat sich zusammengezogen und übt nun einen gewaltigen Druck auf die Theile im Innern aus. Als Folge sehen Sie nicht nur das schwarze Kreuz, die radiale Anordnung der Elasticitätsaxe anzeigend, sondern ausserdem noch eine Anzahl Newtonscher Ringe von fast ähnlicher Farbenfolge wie bei den Farben vierter Ordnung.

Schliesslich will ich ein Glasstück auf mechanischem Wege durchbiegen, indem ich es in einen Metallrahmen spanne und dann seinen mittleren Punkt mittels einer Schraube zur Seite drücke. Im „dunklen Feld“ zeigt das Glasstück ohne Druck weder Farbe noch Licht, bis ich die Schraube anziehe. Sobald ich aber einen Druck ausübe, erscheint am Orte des Drucks ein leuchtendes Muster, von welchem sich zwei Lichtstrahlen unter einer Neigung von 45 Grad nach beiden Seiten ausbreiten. Ein festeres Anziehen der Schraube

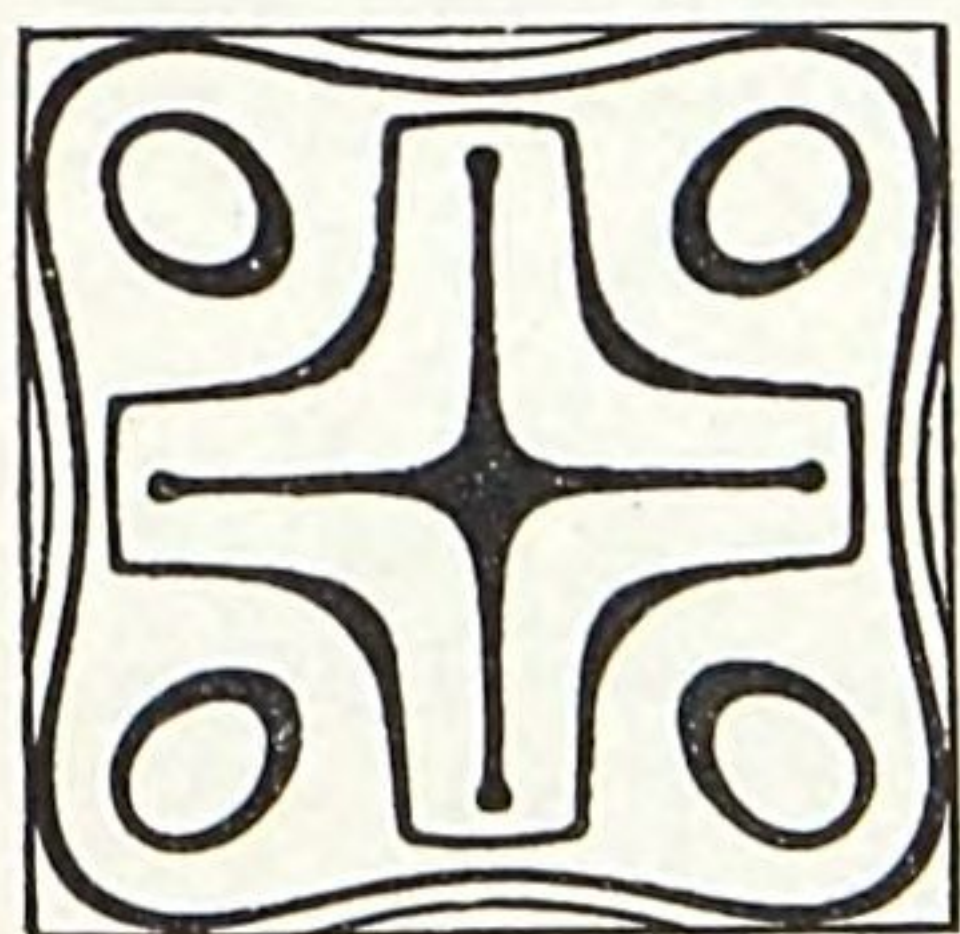


Fig. 87.

vergrössert den mittleren Fleck und vermehrt den Glanz der Strahlen. Lockere ich die Schraube ganz, so verschwinden die Strahlen und das Glas nimmt seinen gewöhnlichen, farblosen Zustand von vorher an.

So sehen Sie also, dass man das polarisirte Licht nicht nur gebrauchen kann, um falsche Edelsteine von echten zu unterscheiden, nicht allein um Glas von Krystall zu trennen, sondern auch um zu erforschen, ob ein Glas leicht brechen wird oder nicht. Jedes Glasstück, welches zu plötzlich abgekühlt und nicht langsam genug von der Ofenhitze zur gewöhnlichen Temperatur übergeführt worden ist, kann durch die Farben erkannt werden, welche es im Polariskop zwischen Polarisator und Analysator zeigt.

Für diese und ähnliche Zwecke ist das in Fig. 88 abgebildete sehr einfache Polariskop vollkommen ausreichend, welches sich jeder intelligente Knabe leicht selbst anfertigen kann. Es besteht ganz aus Glas. Der Polarisator ist einfach ein ebenes Stück Fensterglas, 9 cm lang und 5 cm breit,¹⁾ auf seiner unteren Fläche mit schwarzem Asphaltack überzogen und auf einem einfachen Holzrahmen gelagert. Zwei andere Glasstücke haben eine Grösse von $8\frac{1}{4}$ mal 5 cm, von denen das eine der beiden aus durchsichtigem Fensterglas, das andere aus mattgeätztem Glas oder Milchglas besteht. Auf den unteren Theil der durchsichtigen Glasplatte, $1\frac{5}{8}$ cm von deren

1) Im Original sind statt der Centimeter überall Zoll gesetzt.

Kante entfernt, wird ein Glasstreifen von etwa 5 cm Länge und 1 cm Breite gekittet, der als Stütze für die zu betrachtenden Objecte dienen soll. Beide gleichgrossen Glasplatten werden längs der sich berührenden Kante oben mit Hülfe eines Stückes Papier oder Tuch eng mit einander verbunden. Sie stehen wie ein Dach über der geschwärzten Glasplatte und werden in ihrer Lage auf der Grundplatte durch zwei Leisten gehalten, welche $9\frac{3}{4}$ cm von einander entfernt sind. Die Grundplatte soll 17 cm lang und 5 cm breit sein. Das auf die Milchglasplatte fallende Tages- oder Lampenlicht erreicht die unten geschwärzte Grundplatte, wird daselbst unter einem Winkel von etwa 57 Grad reflectirt und gelangt als ein polarisirtes Strahlenbündel durch das durchsichtige Glasstück

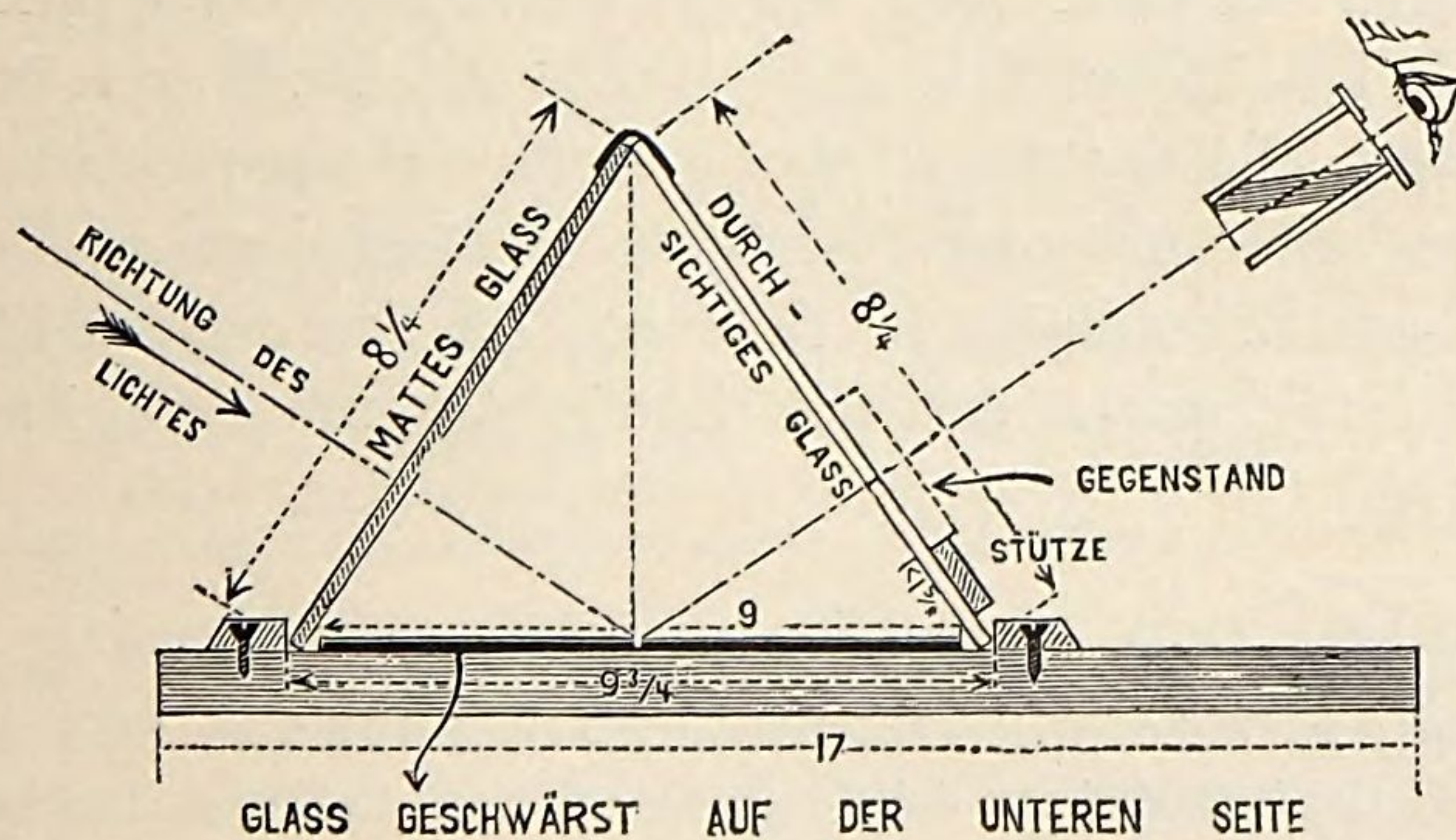


Fig. 88.

in das Auge. Als Analysator müssen wir uns, wegen des hohen Preises der Nicolschen Prismen ebenfalls einer billigeren Einrichtung bedienen. Ein solcher, für viele Zwecke sehr brauchbarer Analysator wird auf folgende Weise erhalten. Man nimmt ein Bündel von 8 bis 10 sehr dünnen Glasplättchen,¹⁾ von denen jedes etwa 4 cm lang und 1,5 cm breit ist und befestigt diesen Plattensatz mit Siegelack in einer kleinen, beiderseits offenen Holzhöhre, und zwar unter einem Winkel von 33 Grad gegen die Richtung geneigt, in welcher die Lichtstrahlen die Röhre durchsetzen.

Sie können mittels sehr einfacher Apparate viele der Experimente, welche ich Ihnen gezeigt habe, wiederholen und bestätigen. Uebrigens giebt es noch viele Erscheinungen, welche ich Ihnen nicht zeigen konnte; denn in einer einzigen Stunde kann man sich nur

1) Die sehr dünnen, für mikroskopische Deckgläschen verwandten Glasplättchen sind hierfür besonders empfehlenswerth.

sehr unvollständig mit dem sehr interessanten aber complicirten Gegenstand der Polarisation beschäftigen. Ich habe Ihnen weder gezeigt, dass der Quarz die specielle Eigenschaft hat, die Polarisations-ebene zu drehen, noch habe ich Ihnen mitgetheilt, dass Lösungen von Zucker und viele andere Flüssigkeiten ebenfalls eine solche Drehung hervorbringen. Wie wichtig diese Erscheinungen sind, geht daraus hervor, dass man in Zuckerfactoreien den Gehalt einer Syruplösung an Zucker mittels des Polariskops feststellt, indem man eine bestimmte Menge der Lösung zwischen die beiden Nicolschen Prismen bringt und misst, um wie viel Grad die Polarisationsebene gedreht wird.¹⁾ Auch habe ich Ihnen nichts erzählt von der wichtigen Entdeckung Faradays, mit welcher er seine hierher gehörigen Versuche krönte, nämlich, dass die Polarisationsebene des Lichtes in Glas, Schwefelkohlenstoff u. s. w. durch einen Magneten gedreht werden kann. Lassen Sie mich die Hoffnung aussprechen, dass Sie eines Tages selbst alle diese herrlichen Entdeckungen kennen lernen mögen, deren Erkenntniss Ihnen durch die hier besprochenen einfacheren Erscheinungen der Polarisation wesentlich erleichtert werden wird.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Wer sich eingehender mit den Apparaten zur Messung der Drehung der Polarisationsebene beschäftigen will, dem sei die vortreffliche, leichtfassliche, dabei streng wissenschaftliche Bearbeitung von Dr. O. Schönrock im Landoltschen Werk: „Das optische Drehungsvermögen“, Verlag von Fr. Vieweg & Sohn in Braunschweig, 1898, empfohlen.

Vierte Vorlesung.

Das unsichtbare Spectrum (ultravioletter Theil).

Das Spectrum erstreckt sich dem Auge unsichtbar zu beiden Seiten des sichtbaren Spectrums. Zur Seite des rothen Endes befinden sich die langen Wellen, welche die Körper erwärmen, aber nicht erleuchten. Man bezeichnet sie als Wärmewellen oder auch als ultraroth Wellen. Zur Seite des blauen Endes des sichtbaren Spectrums befinden sich die kurzen Wellen, welche eine chemische Wirkung auf die Körper ausüben und actinische oder ultraviolette Wellen genannt werden. Wie man das unsichtbare ultraviolette Licht von den sichtbaren Strahlen absondert. Wie man das unsichtbare ultraviolette Licht sichtbar macht. Gebrauch von Fluoreszenzschirmen. Reflexion, Brechung und Polarisation des ultravioletten Lichtes. Luminescenz: Fluorescenz und Phosphorescenz. Wie man Leuchtfarbe herstellt. Experimente mit phosphorescirenden Körpern. Andere Eigenschaften des unsichtbaren ultravioletten Lichtes. Seine Eigenthümlichkeit elektrische Körper zu entladen. Photographische Wirkung des sichtbaren und unsichtbaren Lichtes. Die farbige Photographie. Die Reproduction der natürlichen farbigen Objecte durch die sogenannte Drei-Farbenphotographie. Ives' Photochromoskop. Lippmanns Entdeckung der Photographie in natürlichen Farben.

Alle Lichtarten im sichtbaren Spectrum sind zwischen dem äussersten Roth am einen Ende und dem äussersten Violett am anderen Ende enthalten. Ihre Wellenlängen variiren von etwa 820 Milliontel Millimeter oder $820 \mu\mu$ (äusserstes Roth) bis 380 Milliontel Millimeter oder $380 \mu\mu$ (äusserstes Violett). Aber ausser den Wellen der verschiedenen Farben innerhalb der genannten Grenzen, welche zugleich sichtbar sind, giebt es noch andere Aetherwellen, welche zwar keine Wirkungen auf unser Auge hervorbringen, also unsichtbar, aber dennoch „Lichtwellen“ sind.¹⁾ Kurz, das Spectrum einer

1) Anmerkung des Uebersetzers: Der Verfasser vertheidigt zwar im Folgenden diese Bezeichnungsweise, indem er darauf hinweist, dass diese unsichtbaren Lichtwellen sich in physikalischer Beziehung genau ebenso wie die wirklichen, vom Auge wahrgenommenen Lichtwellen verhalten. Es fragt sich nur, ob die Verallgemeinerung der Bezeichnungsweise „Lichtwellen“ auf alle Aetherwellen auch auf jene Aetherschwingungen, die die elektrischen Vorgänge und vielleicht auch die Röntgenschen Erscheinungen vermitteln, der Vorstellung förderlich, oder eher die Anschauung zu verwirren geeignet ist. Alle durch „Strahlung“, d. h. vermittlels der Aetherwellen wirksamen Kräfte ähneln dem Licht doch nur in Bezug auf die Art, wie sie vom wirkenden Körper, der Strahlungsquelle, zum „bestrahlten“ Körper vermittelt werden, nicht aber in Bezug auf ihre Wirkung. Eine Lichtquelle wie die Sonne reizt nicht nur den Sehnerv des Auges; auf unsere Hand

Lichtquelle wie die Sonne, dehnt sich in beiden Richtungen, wenn auch dem Auge unsichtbar, weit übers Roth und übers Violett hinaus aus.

Vielleicht erheben Sie den Einwand, dass, wenn diese Wellen unsichtbar sind, sie auch nicht als Lichtwellen bezeichnet werden können. In der That ist diese Benennung auch nicht erlaubt, wenn Sie als Definition von vornherein festsetzen, dass der Ausdruck „Licht“ nur auf diejenigen Wellen angewendet werden soll, welche dem menschlichen Auge wirklich sichtbar sind. Aber wie nun, wenn es andere Augen geben sollte oder andere Vorgänge, welche diese Wellen in den Stand setzen, sich bemerkbar zu machen? Und weiter, wenn man findet, dass diese unsichtbaren Wellen mit den sichtbaren Wellen in anderen wichtigen Eigenschaften übereinstimmen, und wenn sie, wie es thatsächlich der Fall ist, reflectirt und gebrochen, polarisirt und gebeugt werden können, wie die Lichtwellen, können wir sie dann nicht ebenfalls als Lichtwellen bezeichnen? Sie mögen Wellenlängen haben, welche grösser sind

treffend, ruft derselbe Sonnenstrahl Wärmegefühl hervor, der vom Auge als Licht empfunden wird und welcher auf der photographischen Platte die Silbersalze zersetzt. Die elektrischen Wellen z. B. vermögen aber weder Licht- noch chemische Wirkungen hervorzubringen, und doch sind sie in Form von „Wellen“ sich ausbreitende „Zustandsänderungen“ des Aethers, die sich mit der Geschwindigkeit des Lichtes im Raume fortpflanzen. Eins nur ist allen diesen „Wellen“ gemeinsam: Sie führen mit sich eine gewisse Energie, die sie vom Sitz der Kraft (der Strahlungsquelle im weitesten Sinne des Wortes) zum „bestrahlten“ Object hinüberführt. Von der Art des strahlenden Körpers und der Beschaffenheit des bestrahlten Körpers hängt aber die als „Wirkung“ sich äussernde, vermittelte Energie ab. Die Sonnenstrahlen äussern sich als Licht, wenn sie in das Auge gelangen, als Wärme, wenn sie die Hand treffen, als chemische Kraft, wenn sie auf die photographische Platte wirken. Die elektrischen Strahlen erzeugen den Funken im Hertzschen Resonator und ordnen das Eisenfeillicht im Coherer. Will man also alle Wellen unter einem Namen zusammenfassen, so muss man vom „bestrahlten“ Körper absehen und nur das allen Wellen gemeinsame Moment hervorheben. „Aetherwellen“ oder „Energiewellen“ scheint mir daher ein richtigerer Ausdruck zu sein als „Lichtwellen“. Als Energiewellen erweisen sich sowohl die elektrischen, wie die Licht- und die Wärmewellen; und auch die Röntgenschen X-„Wellen“ dürfen vielleicht als solche aufgefasst werden. Nur die Kathodenstrahlen sind nicht auf Wellen des Aethers zurückzuführen, vielmehr scheinen sie durch geschleuderte Partikelchen eines noch nicht entdeckten Substrates zu Stande zu kommen. Populärer freilich wird stets der vom Autor gebrauchte Name (Lichtwellen) sein und darum hat der Uebersetzer geglaubt, den Ausdruck „unsichtbares“ Licht wenigstens für die durch Aetherwellen vermittelten Vorgänge beibehalten zu sollen.

als die der rothen oder kleiner als die der violetten Strahlen, sodass unser Auge in Folge des geringen Bereichs seiner Empfindlichkeit unfähig ist, dieselben zu empfinden. Wenn sie in ihren physikalischen Eigenschaften aber mit den sichtbaren Strahlen übereinstimmen, so geht aus der Thatsache, dass sie trotzdem unsichtbar sind, weiter nichts hervor als die Unvollkommenheit unseres Auges!

Hätten wir unser ganzes Leben lang hinter Schirmen von rothem Glas zugebracht, so würden wir durch unsere Augen niemals etwas von den grünen oder blauen Wellen erfahren haben: wir würden gegen Wellen dieser besonderen Art blind geworden sein. Aber obgleich wir sie nimmer gesehen hätten, so beweist das doch nicht, dass sie keine Lichtwellen sind.

Jener Theil des unsichtbaren Spectrums, welcher die Wellen umfasst, deren Wellenlänge zu gross ist, als dass sie unser Auge erregen können, besitzt dafür eine andere Eigenschaft, nämlich die Gegenstände zu erwärmen, auf welche sie fallen und von denen sie absorbirt werden. Freilich kommt diese Eigenschaft auch den sichtbaren Wellen und von diesen besonders den rothen zu, aber in viel geringerem Grade. Die langen, unsichtbaren Wellen werden daher meist als „Wärme- oder ultraroth Wellen“ bezeichnet. Wir werden uns mit ihnen in der nächsten Vorlesung beschäftigen.

Am anderen Ende des sichtbaren Spectrums, jenseits Violett, haben wir Strahlen, welche ebenfalls unsichtbar sind, und zwar weil sie eine zu kleine Wellenlänge haben, um unser Auge erregen zu können. Diese besitzen dafür andere bemerkenswerthe Eigenschaften. Sie vermögen gewisse chemische Wirkungen hervorzubringen, von denen die photochemischen oder photographischen Wirkungen am bekanntesten sind. Ausserdem bringen sie gewisse physiologische Wirkungen auf thierische und pflanzliche Gewebe hervor. Sie rufen in manchen Körpern die auffallende Eigenschaft wach, im Dunkeln Licht auszusenden, d. h. zu „phosphoresciren“. Schliesslich haben sie gewisse elektrische Eigenschaften. Diese kurzen unsichtbaren Wellen, mit denen wir uns in dieser Vorlesung beschäftigen wollen, sind unter verschiedenen Namen als actinische, photographische oder ultraviolette Wellen bekannt.

Einige dieser chemischen Wirkungen werden wiederum, wenn auch in geringerem Maasse durch die Lichtwellen, insbesondere durch die blauen und violetten Wellen erzeugt. Fig. 89 a. f. S. giebt

in Gestalt von Curven eine allgemeine Idee¹⁾ von der Vertheilung der Energie im Sonnenspectrum für die Wellen verschiedener Länge. Curve *H* deutet die Energievertheilung der ultrarothten Wärmestrahlen, *L* die der Lichtstrahlen und *Ch* diejenige der chemisch wirksamen, ultravioletten Strahlen im Sonnenspectrum an. Die grösste Helligkeit zeigt das Spectrum an der Stelle zwischen den Fraunhoferschen Linien *D* und *E*, welcher die Wellenlänge 550 Milliontel Millimeter ($550 \mu\mu$) zukommt. Die grösste heizende Wirkung rufen die Wellen von etwa $1000 \mu\mu$ hervor, während die grösste chemische Wirkung²⁾ den Wellen von der Länge $410 \mu\mu$ eigen ist.

Es ist nun für experimentelle Zwecke wichtig, die Wellen, welche einen gewissen der genannten Effecte hervorbringen, zu trennen

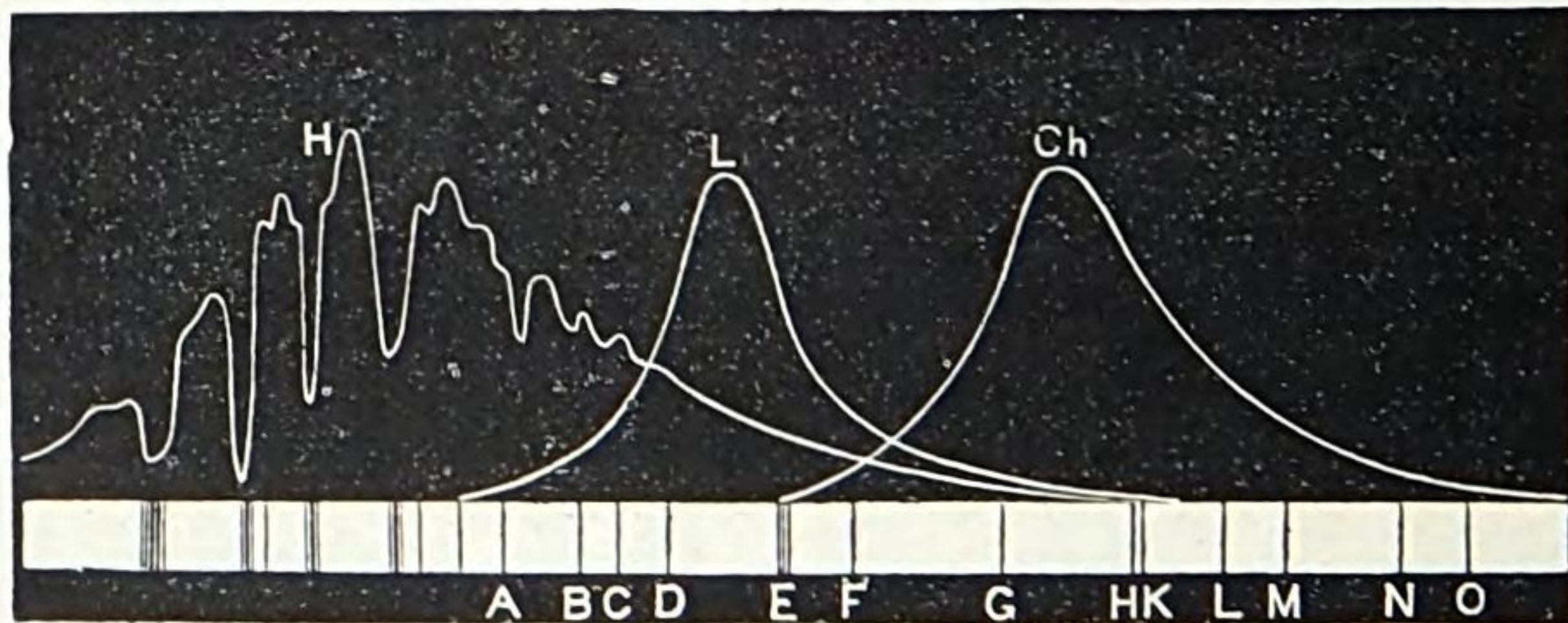


Fig. 89.

von den Wellen, welche eine andere Wirkung erzeugen. Wünschen wir z. B. die ultravioletten Wellen von allen anderen Wellenarten zu trennen, so stehen uns folgende verschiedenen Wege zu Gebote.

Erstens können wir ein Prisma benutzen, welches die Wellen von einander sondert und gemäss ihrer Grössenordnung im Spectrum ausbreitet. Zweitens können wir das Spectrum erzeugen, indem wir uns statt des Prismas eines beugenden Gitters bedienen. Drittens können wir als Trennungsmittel Platten verschiedener Substanzen anwenden, welche die Eigenschaft besitzen, Wellen nur einer Sorte zu verschlucken (absorbiren), die anderen Wellen aber hindurchzu-

1) Eine Tabelle für die Wellenlängen und die Anzahl der Schwingungen der verschiedenen Lichtsorten, von den grössten ultrarothten bis zu den kleinsten ultravioletten, ist als Anhang zu dieser Vorlesung (am Schlusse des Buches) beigelegt.

2) Dies ist der Fall, wenn die chemische Wirkung durch die besondere chemische Reaction des Schwärzens von Chlorsilber gemessen wird. Wenn als Basis der Messung eine andere Reaction gewählt wird, so liegt auch das Maximum der Wirkung an einer etwas anderen Stelle des Spectrums.

lassen. Letzteres Hülfsmittel fanden wir ausgezeichnet in Bezug auf das Licht, denn mit Hülfe eines rothen Glases wurde es uns möglich, fast alle anderen Farben abzuschneiden und nur Roth hindurchzulassen. Leider giebt es keinen vollkommenen „Strahlenfilter“, welcher alles sichtbare Licht abschneidet und nur die ultravioletten Strahlen hindurchlässt. Es mag für viele Zwecke genügen, ein mittels Braunstein oder mittels Braunstein und Kobalt tief violett gefärbtes Glas zu gebrauchen, welches alle sichtbaren Strahlen wenigstens bis auf einen kleinen Theil des Violett absorbirt. Freilich schneidet gleichzeitig jedes Glas auch den äussersten Theil der ultravioletten, chemisch wirksamen Strahlen mit ab. Selbst das leichteste Kronglas, obgleich noch relativ durchsichtig für Wellen von $380\ \mu\mu$ bis herab zu $280\ \mu\mu$ Länge, ist vollkommen undurchsichtig gegen kleinere Wellen; während das schwere, Blei enthaltende, Flintglas undurchsichtig gegen alle Wellen unter $350\ \mu\mu$ ist.

Daher ist es bei Experimenten mit ultravioletten Strahlen ungeeignet, Glaslinsen oder Glasprismen zu gebrauchen, falls man durchsichtigere Substanzen zur Verfügung hat. In der That sind sowohl Quarz als auch Flusspath bei weitem durchlässiger in Bezug auf die ultravioletten Strahlen als es Glas ist. Quarz lässt noch die Strahlen durch bis herunter zur Wellenlänge von $206\ \mu\mu$, Flusspath bis $203\ \mu\mu$. Die optische Laterne ist daher für unsere jetzigen Versuche mit Sammellinsen aus Quarz versehen. Wollen wir ein Spectrum erzeugen, so müssen wir ebenfalls aus Quarz gefertigte Prismen und Linsen anwenden.

Ich werde Ihnen zunächst einige photographische Wirkungen der Lichtwellen demonstrieren. Hier habe ich ein gewöhnliches photographisches Papier, überzogen mit einer empfindlichen Schicht, die mit Chlor- oder Bromsilber imprägnirt ist; nach genügend langer Belichtung wird dasselbe fast schwarz. Ueber dieses Blatt empfindlichen Papiere lege ich einige Schablonen aus Zinkblech und setze sie dem weissen Licht aus, welches von der Bogenlampe auf dem Tische ausgeht. In einer halben Minute ist das Papier genügend gedunkelt; Sie sehen, dass die Lichtwellen da, wo sie das Papier treffen konnten, einen chemischen Effect hervorgebracht und auf diese Weise das Muster der Schablone „abgebildet“ haben. In diesem Experiment konnten alle Strahlenarten, die Wärme-, die sichtbaren und die actinischen Strahlen zum Papier gelangen. Welche von diesen waren nun aber die wirksamsten? Das können wir leicht feststellen. Wir bringen die Lampe in der optischen Laterne zum

Leuchten, benutzen die Quarzlin sen und das Quarzprisma und erzeugen ein Spectrum. Dann breiten wir über das Spectrum in seiner ganzen Länge, bis in das unsichtbare Spectrum zu beiden Seiten hinein, einen langen Streifen unseres empfindlichen photographischen Papiers. Es muss daselbst mehrere Minuten verweilen, während welcher Zeit wir einen anderen Punkt betrachten wollen.

Hier ist ein zweites Blatt empfindlichen Papiers. Ich bedecke es mit einem undurchsichtigen Stanniolblatt, in welches mehrere Löcher geschnitten sind. Auf diese Löcher sind dünne Platten verschiedenen Materials gelegt: 1. Fensterglas, 2. Flintglas, 3. rothes Glas, 4. grünes Glas, 5. blaues Glas, 6. Quarz, 7. Flussspath, 8. Steinsalz und 9. Ebonit. Die ganze Vorrichtung schiebe ich jetzt unter die Bogenlampe, deren Strahlen für diesen Zweck nach unten gerichtet worden sind. Schneidet eine dieser Substanzen die photographisch wirksamen Strahlen ab, so finden wir dies sogleich heraus, denn das Papier wird nur unter denjenigen Substanzen geschwärzt, welche für photographische Strahlen durchsichtig sind. Zwei Minuten Exposition genügt zu dieser Prüfung. Beim Herausnehmen des Papiers bemerken Sie, dass die schwarze Ebonitplatte und das rothe Glas fast gleichmässig die ganze Menge der photographisch wirksamen Strahlen zurückgehalten und verschluckt haben.

Das grüne Glas hat ebenfalls einen beträchtlichen Theil absorbirt und das Flintglas hat sie jedenfalls nicht alle hindurchgelassen. Aber unter den übrigen Substanzen, dem blauen Glas, dem Quarz, dem Steinsalz, dem Flussspath und dem Fensterglas, scheint das Papier um nahe gleichviel geschwärzt. Mit den feineren Hilfsmitteln würden wir freilich auch unter diesen Substanzen kleine Unterschiede in Bezug auf ihre Durchlässigkeit gefunden haben. Von Wichtigkeit ist lediglich die Thatsache, welche wir beobachtet haben, dass nämlich rothes Licht, obgleich es unser Auge zu erregen vermag, auf die photographische Platte so gut wie keine Wirkung ausübt. Jeder Photograph weiss dies, denn er benutzt diese Erfahrung und verwendet Rubinglas zum Fenster seines „Dunkelzimmers“ oder als Cylinder für seine Lampe, bei deren Licht er die Platten bereitet und entwickelt.

Inzwischen ist unser langer, dem ganzen Spectrum ausgesetzt gewesener Streifen empfindlichen Papiers ausexponirt und wir sehen bei seiner näheren Prüfung, dass er am empfindlichsten geschwärzt ist am violetten Ende und jenseits dieses Endes bis in das ultraviolette, unsichtbare Spectrum hinein, sodass wir sagen können,

es liegt das „photographische“ Spectrum jenseits Violett oder in anderen Worten, die chemisch wirksamsten Wellen sind kürzer als alle sichtbaren Wellen.

Dabei dürfen wir aber nicht vergessen, dass bei anderer chemischer Zubereitung der empfindlichen Platten auch die Lage der photographischen Empfindlichkeit in dem Spectrum verschoben werden kann. Durch Einführung von Bromsilberemulsionen, welche so präparirt sind, dass sie nicht nur auf das violette und ultraviolette Licht reagiren, sondern auch auf Grün, Gelb und selbst Roth, d. h. durch Herstellung sogenannter farbenempfindlicher, photographischer Platten gelingt es, die Platten auch für das sichtbare Spectrum empfindlich zu machen.

Ein anderer chemischer Effect, welchen die Lichtwellen hervorbringen können, besteht darin, dass sie ein Gemisch von Chlor und Wasserstoffgas in chemische Action zu einander versetzen. Diese durch Elektrolyse aus Salzsäure entstehenden Gase können gemischt aufbewahrt werden, ohne dass sie chemisch aufeinander einwirken, wenn man sie nur in dunkle Glasflaschen einsperrt und so vor Lichteinwirkung schützt. Sobald sie aber dem Licht ausgesetzt werden, gehen sie eine chemische Verbindung ein, und trifft ein so starkes Licht wie das der Sonne die Gasmischung, so geht die chemische Reaction derart schnell vor sich, dass die Flasche explodirt. Wiederum entsteht hier die Frage, welche Lichtwellen verursachen diese chemische Wirkung? Sicher nicht die rothen Strahlen, da die Gasmischung in Flaschen aus rothem Glas dem Licht ausgesetzt werden kann, ohne dass eine chemische Reaction eintritt. Die wirksamen Wellen sind auch in diesem Falle die ultravioletten Strahlen.

Eine dünne Glaskugel, welche die Mischung beider Gase enthält, wird jetzt von meinem Assistenten einer Büchse aus Zinkblech entnommen, wo sie bisher aufbewahrt wurde. Um einen Unglücksfall zu vermeiden, setzen wir diese Glaskugel in eine leere Laterne (Fig. 90), durch deren Oeffnung wir von aussen die Strahlen einer Bogenlampe eintreten lassen. Um die Masse des sichtbaren Lichtes abzuschneiden, schicke ich die Strahlen erst durch eine Reihe violett gefärbter Gläser, welche nur das violette und ultraviolette Licht

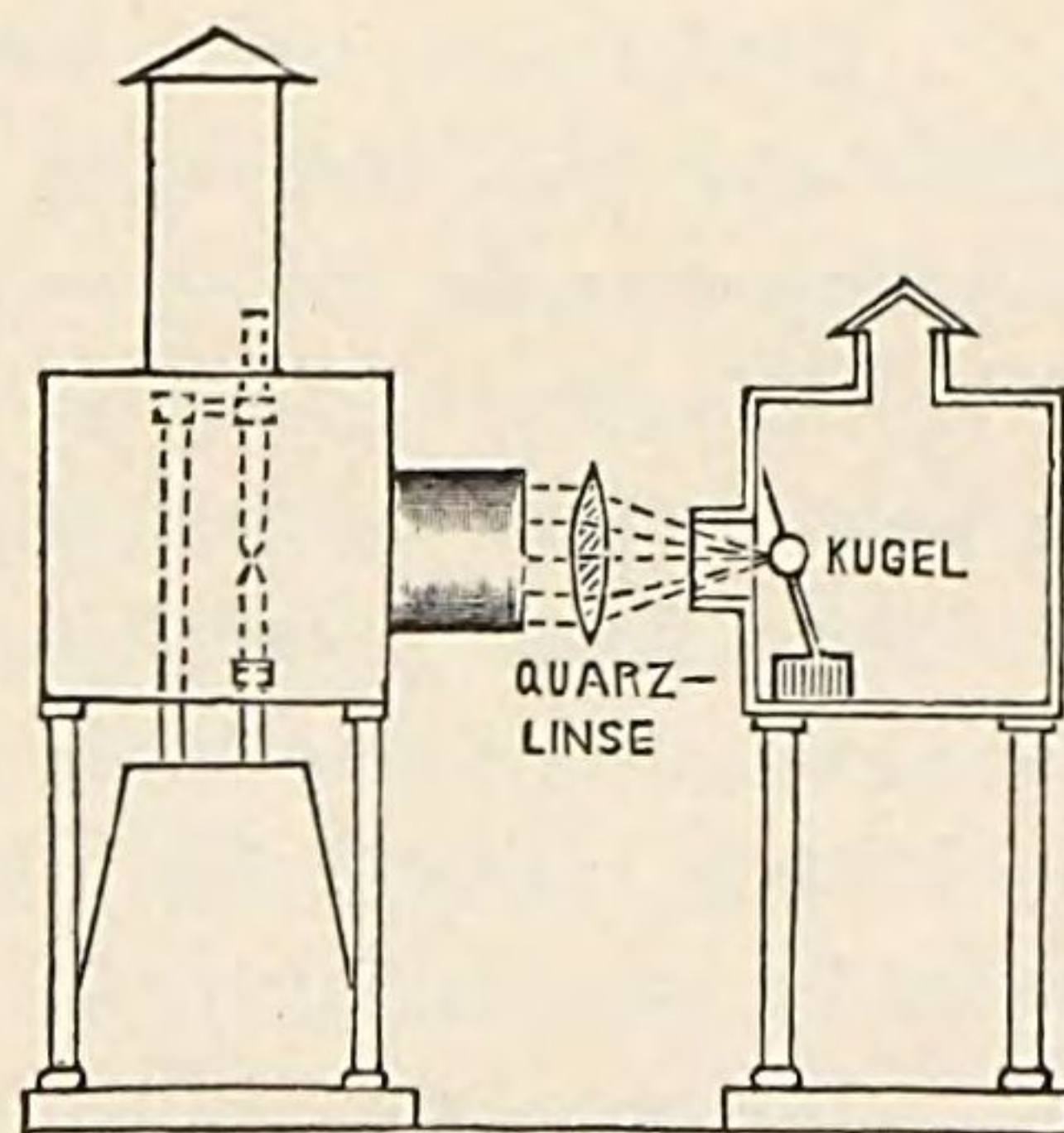


Fig. 90.

hindurchgehen lassen. Dann setze ich eine Quarzlinse dazwischen, um die Strahlen auf der Glaskugel zu concentriren und Sie hören — bitte erschrecken Sie nicht — die Explosion der Kugel, wodurch die chemische Wirksamkeit der Wellen dieser Art deutlich erwiesen ist.

Vielleicht mag einigen von Ihnen der Gedanke gekommen sein, dass es bei einer so grossen chemischen und photographischen Wirksamkeit auch möglich sein müsse, Gegenstände zu photographiren, welche dem Auge unsichtbar sind. Und in der That ist dies der Fall. Es sind einige 20 Jahre her, dass in diesem Saal von Dr. J. Hall, dem alten Veteranen der Chemie, eine Vorlesung gehalten wurde, welche durch Vorführung der Photographie des „Unsichtbaren“ grossen Erfolg hatte.

Hinter mir, nahe der Wand, steht ein mit einem Blatte weissen Zeichenpapieres bedecktes Zeichenbrett, auf welches ich das Licht der Bogenlampe dirigire. Sie sehen jetzt bloss eine weisse Fläche. Herr Photograph Norris hat die Güte gehabt, seine photographische Camera hierher zu bringen und wird eine Aufnahme von dem Papier machen. Nach Entwicklung der Platte werden Sie sehen, dass auf dem Papierblatt eine Inschrift aufgetragen war, welche, obgleich Ihnen unsichtbar, mittels der photographischen Aufnahme zum Vorschein gebracht worden ist.¹⁾

Die photographische Wirkung der ultravioletten Strahlen, welche diese Wellen selbst in Abwesenheit aller übrigen sichtbaren Strahlen ausüben, kann man bei der weiteren Erforschung der Eigenthümlichkeiten dieser Wellen benutzen. Wir können die photographischen Platten verwenden, um die Reflexion und Brechung dieser Wellen ebensogut wie deren Interferenz und Beugung nachzuweisen. Es giebt aber noch eine andere und schnellere Methode der Untersuchung, zu welcher wir jetzt übergehen wollen.

Anstatt die unsichtbare Region des Spectrums zu photographiren, können wir dieselbe dem Auge auch sichtbar machen, wenn wir die Entdeckung von Herschel, Brewster und Stokes verwerthen. Es giebt eine ganze Anzahl von festen Körpern, wie z. B. Flusspath,

1) Die Schrift auf dem Blatt war mit farblosem, schwefelsaurem, in Citronensäure gelöstem Chinin geschrieben worden. Diese Substanz fluorescirt und in Folge des Fluorescirens vernichtet sie das ultraviolette Licht, welches sonst auch an den beschriebenen Theilen des Papiers reflectirt werden würde. Die Folge davon ist, dass die Stellen, wo sich das schwefelsaure Chinin befindet, weniger photographisch wirksames Licht zur Camera senden und demnach dunkler erscheinen als die Stellen, an denen sich keine fluorescirende Substanz befindet.

Uranglas, und ebenso Flüssigkeiten, wie z. B. Petroleum, Chininlösung und viele Farbstoffe, welche aus dem Kohlentheer gewonnen sind, die oberflächlich eine Farbe aufweisen, welche von derjenigen im Inneren abweicht. Obgleich Chinin farblos ist, zeigt es auf der Oberfläche eine schöne blaue Farbe, sobald man das Licht darauf scheinen lässt. Uranglas selbst ist gelb gefärbt, hat aber eine glänzende, grüne Oberflächenfarbe. Thatsache ist, dass diese Substanzen die Eigenthümlichkeit besitzen, die sehr kleinen Wellen des unsichtbaren ultravioletten Lichtes zu verschlucken und sie in solches Licht umzuwandeln, welches wir mit dem Auge empfinden können. Dieser merkwürdigen Eigenschaft gab Stokes den Namen „Fluorescenz“. Lassen Sie uns einige der hauptsächlichsten, hierhergehörigen Erscheinungen kennen lernen.

Von der optischen Laterne, welche für diesen Zweck mit Quarzlinsen versehen ist, geht ein Lichtbüschel aus. Die Mündung der Lampe ist bedeckt mit einem dunklen, violetten Glas, welches alle sichtbaren Strahlen abschneidet — mit Ausnahme der violetten —, welche die unsichtbaren, ultravioletten Wellen unvermeidlich begleiten. Ich richte die austretenden Strahlen auf einen Würfel von Uranglas und Sie sehen, wie er unter dem Einfluss der unsichtbaren Wellen im Dunkeln lebhaft zu leuchten beginnt und ein glänzendes grünes Licht ausstrahlt.

Ich halte in den Strahlengang eine mit Paraffinöl gefüllte Flasche; sie leuchtet sehr schön blau. Ein grüner Absud von Spinatblättern (erst in Wasser gekocht, dann getrocknet und schliesslich mittels Aether extrahirt) zeigt eine seltsame blutrothe Färbung längs seiner Oberfläche. Hier habe ich ferner eine Reihe von Probeflaschen, gefüllt mit verschiedenen fluorescirenden Flüssigkeiten. Gelbes Fluorescein giebt eine glänzende grüne Fluorescenzfarbe. Blassrosa gefärbtes Eosin (erhalten durch Verdünnung rother Tinte) giebt orangefarbene Fluorescenz. Eine carmoisinfarbene Lösung von Magdalaroth besitzt eine scharlachrothe Fluorescenzfarbe; farbloses Chinin erzeugt die charakteristische Oberflächenfarbe Blau.

Diese Erscheinungen können sehr viel auffälliger demonstriert werden, indem man durch Spiegelung ein ultraviolettes Strahlenbüschel nach unten in ein weites Glasgefäss wirft, welches mit den fluorescirenden Flüssigkeiten gefüllt ist. Eine oberhalb des Gefässes befestigte Quarzlinse (Fig. 91 a. f. S.) dient dazu, das Strahlenbüschel zu concentriren und auf diese Weise einen scharfbegrenzten Strahlenkegel zu erzeugen. Ich nehme ein Gefäss, gefüllt mit einer Lösung von

Ammoniakwasser und dirigire das Strahlenbüschel in dasselbe. Dann werfe ich in dieses Wasser einige Körner von festem, trockenen Fluorescein. Sobald sich diese lösen, fallen sie zu Boden und erzeugen dabei Locken von schöner grüner Farbe und von unbeschreiblichem Glanz. Einige Stücke der Rinde von Rosskastanie oder der Eiche würden ähnliche Wirkungen hervorbringen.

Und nun errathen Sie vielleicht von selbst das Geheimniss der Photographie des Unsichtbaren: Die auf jenes weisse Blatt geschriebene Schrift war mit farbloser Chininlösung angefertigt. Damit Sie aber die im gewöhnlichen Licht unsichtbare Inschrift auch sehen, brauche ich auf das Papier nur ein Strahlenbündel unsichtbaren,

ultravioletten Lichtes zu werfen, um zu bewirken, dass die beschriebenen Stellen in Folge von Fluorescenz geisterhaft mit zarter blauer Farbe inmitten der Dunkelheit leuchten.

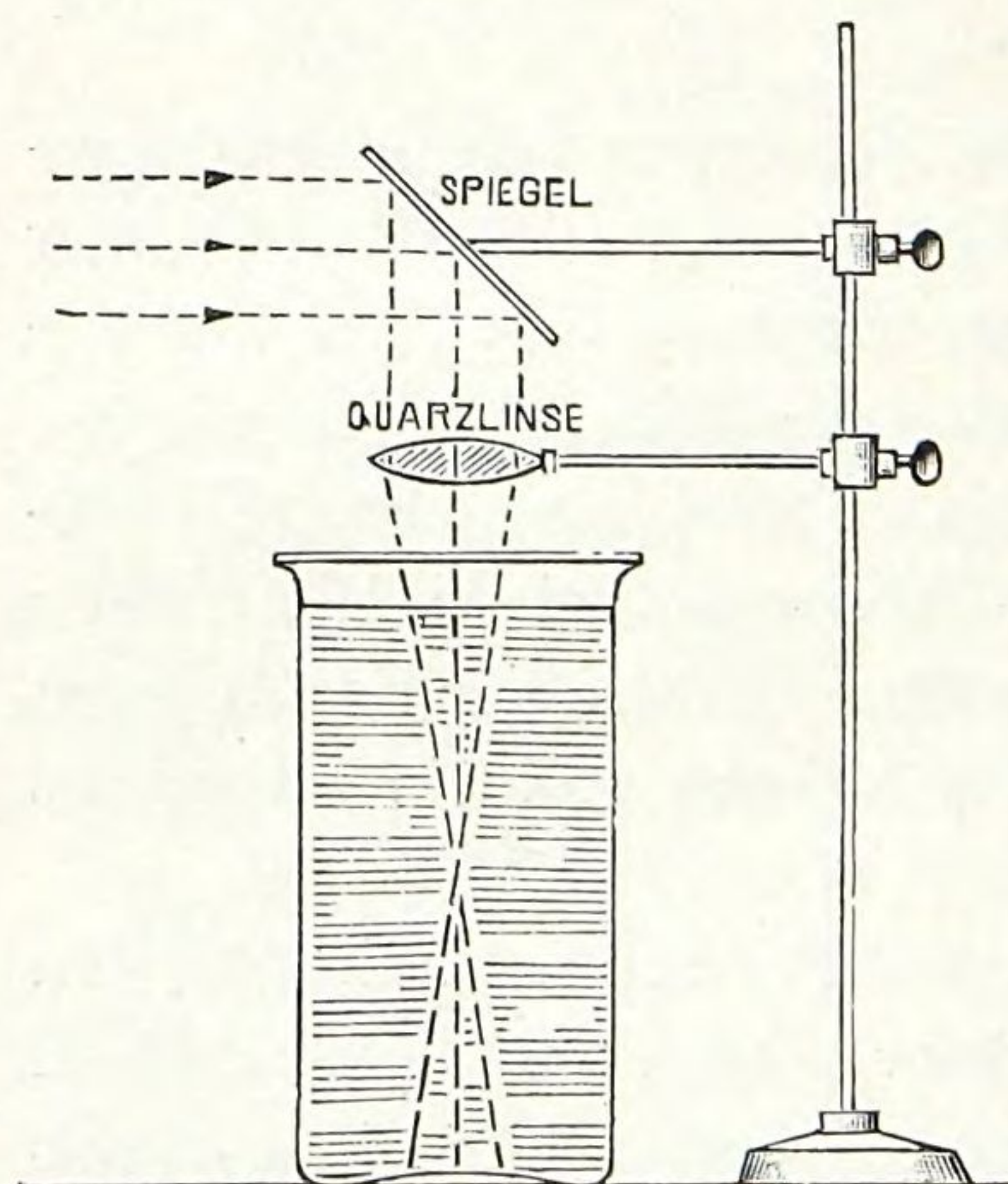


Fig. 91.

Hier sind einige andere Papierblätter, welche mit fluorescirenden Mustern bemalt worden sind. Auf eines derselben sind nebeneinander zwei Lilien (fleurs-de-lys) gezeichnet, welche beim Tageslicht gleich gelb erscheinen. Die eine ist bemalt mit Gummigutt, die andere mit Fluorescein. Dirigire ich auf sie das durch ein dunkelblaues Glas filtrirte Lichtbüschel der Lampe, so färbt sich

das ganze Papier tief violett, die eine der Lilien erscheint schwarz, die andere aber leuchtet hell mit grüner Farbe.

Ein anderer Carton sieht im gewöhnlichen weissen Licht auf seiner ganzen Oberfläche blassgelb aus: Da aber der eine Theil mit Gummigutt, der andere mit Fluorescein bemalt ist, so erhalten wir im ultravioletten Licht ein schwarzes Muster auf hellem Grunde.

Als Professor Tyndall vor 20 Jahren in den vereinigten Staaten seine berühmten Vorlesungen über das Licht hielt, empfing er vom Präsidenten des Stevens-Instituts in Hoboken, Namens Morton, einige Proben eines neuen fluorescirenden Kohlenwasserstoffs „Thallin“, welcher aus Petroleumrückständen hergestellt war. Unter den Objecten, welche Professor Tyndall mit nach London zurück brachte, befanden sich Malereien von Blumen, welche mittels Thallins und

anderer fluorescirenden Flüssigkeiten gemalt waren. Diese sind sorgfältig in der Royal Institution aufgehoben worden und ich kann Ihnen dieselben daher in ihrer ganzen Schönheit vorführen. Eine dieser Malereien stellt eine wilde Malve dar, deren Blätter mit grün fluorescirender Substanz gefärbt sind, während ihre Blüthen eine blasspurpurne Fluorescenz zeigen. Werfe ich auf dieses Object Licht, welches durch ein dunkelblaues oder violettes Glas gegangen ist, so entsteht eine wunderbare Wirkung.

Von allen bekannten Substanzen fluorescirt die etwas kostspielige Substanz Namens Bariumplatincyänür am meisten. Im gewöhnlichen Licht ist es ein gelbgrünes Pulver, ähnlich dem pulverisirten Schwefel. Schüttet man es auf ein mit Klebstoff versehenes Papier und lässt violettes Licht darauf fallen, so sendet es gelbgrünes Licht von einem Glanz aus, welcher denjenigen des Uranglases und des Fluoresceins weit übertrifft.

Im Besitz eines so ausgezeichneten Mittels, die ultravioletten Wellen sichtbar zu machen, wollen wir den Fluoreszenzschirm benutzen, um das ultraviolette Spectrum zu erforschen, ähnlich wie es Stokes schon im Jahre 1851 gethan hat. Mein Assistent setzt das Quarzprisma vor den Spalt, um noch einmal das Spectrum zu entwerfen. Ich nehme einen langen, mit Chinin bestrichenen Streifen Papier, und halte ihn so, dass das Spectrum den mittleren Theil bedeckt. Sie sehen, dass das Spectrum sich jetzt sichtbar weit über das Violett hinaus erstreckt, das Violett des sichtbaren Spectrums dagegen in bleicher Färbung erscheint. Ersetzen wir das Papier durch eine Platte aus Uranglas, so bemerken wir ebenfalls eine Verlängerung des violetten Theiles in einer Ausdehnung, welche den sichtbaren Theil um das Doppelte übertrifft. Schliesslich benutze ich den am besten fluorescirenden Schirm aus Bariumplatincyänür und Sie sehen, dass sich jetzt das Spectrum ins Ultraviolett hinein um die drei- oder mehrfache Länge des sichtbaren Spectrums erstreckt. Bringen wir den fluorescirenden Schirm an das andere Ende des Spectrums in das Roth, so erhalten wir gar keine Fluorescenzwirkung.

Wir wollen jetzt die Lichtwirkung der fluorescirenden Schirme benutzen, um kennen zu lernen, in wie verschiedenem Grade die ultravioletten Wellen von den durchsichtigen Substanzen hindurchgelassen oder absorbirt werden. Ich projicire wieder den ultravioletten Theil des Spectrums auf den Schirm, dessen Oberfläche in Folge dessen die Fähigkeit erlangt, das schöne grüne Licht aus-

zusenden. Bringe ich jetzt in den Gang der unsichtbaren Strahlen zunächst ein Stück Fensterglas, so wird das Licht zwar geschwächt, nicht aber ausgelöscht. Eine Platte aus Flintglas schneidet das Licht dagegen vollständig ab; ein blaues Glas schwächt das Licht, löscht dasselbe aber nicht aus, während ein rothes Glas sich als vollständig undurchlässig erweist. Eine Quarzplatte ist vollkommen durchlässig, eine Kalkspathplatte schon weniger, während ein dünnes Blatt Gelatine von gelber Färbung ganz undurchlässig ist. Diese Experimente bestätigen jene, welche wir mit Hülfe des photographischen Papiers gemacht haben.

Jetzt sind wir im Stande, in wenigen Minuten die Reflexion und Brechung der ultravioletten Strahlen zu demonstrieren. Ich bringe meinen Fluoreszenzschirm an eine Stelle, wo keine Wellen auf directem Wege hingelangen. Halte ich jetzt einen Spiegel in das unsichtbare Strahlenbüschel und reflectire dasselbe auf den Schirm, so leuchtet dieser sogleich in seiner charakteristischen grünen Farbe auf. Um die Brechung nachzuweisen, lasse ich das unsichtbare Strahlenbüschel auf ein Quarzprisma fallen, welches die ultravioletten Wellen bricht und zum Schirm hinlenkt; Sie sehen, wie auch jetzt der Schirm fluorescirt. Die Polarisation kann mit Hülfe zweier Nicolschen Prismen in gleicher Weise nachgewiesen werden, wie ich es in meiner letzten Vorlesung für gewöhnliches Licht gethan habe.

Die Erscheinung der Fluoreszenz ist eine der vielen besonderen Erscheinungen, welche man unter dem Namen der „Luminescenz“ zusammenfasst. Dieser Name wurde von Professor E. Wiedemann allen jenen Phänomenen gegeben, bei denen eine Lichtausstrahlung hervorgebracht wird, ohne dass die Temperatur des leuchtenden Körpers jene Höhe erreicht, welche der gewöhnlichen Lichtemission in Folge Temperatursteigerung entspricht.

Um gewöhnliche feste Körper, wie z. B. Kohle, zur Rothgluth zu bringen, müssen sie auf eine Temperatur von etwa 500 Grad C. erhitzt werden. Um sie weissglühend zu machen, d. h. um zu bewirken, dass sie ausser den rothen Strahlen auch noch grüne, gelbe und blaue aussenden, muss ihre Temperatur bis auf 1000 Grad C. und höher gesteigert werden. Bei Rothgluth sendet ein Körper wenig oder gar kein Licht von grüner und blauer Farbe aus, während wir gesehen haben, dass die fluorescirenden Substanzen schon bei gewöhnlicher Zimmertemperatur helles blaues und grünes Licht aussenden, wenn man unsichtbare violette Wellen darauf fallen lässt. Fluorescenzlicht kann man daher als „kaltes“ Licht bezeichnen; im

Gegensätze zum „warmen“ Leuchten, nämlich dem Leuchten in Folge erhöhter Temperatur.

Wir wollen jetzt prüfen, unter welchen Umständen ein Körper ausser in Folge von Fluorescenz sogenanntes „kaltes“ Licht aussendet. In der folgenden Tafel finden Sie die verschiedenen Arten von Luminescenz angegeben.

Erscheinungen	Substanzen, bei welchen sie auftreten.
1. Chemische Luminescenz	{ Oxydirender Phosphor in feuchter Luft; faulendes Holz; faulende Fische; der Glühkäfer; Meeresleuchten etc.
2. Photo-Luminescenz	{ Flusspath; Uranglas; Chinin; Platin-
a) Fluorescenz	{ cyanüre verschiedener Basen; Eosin und viele Steinkohlentheer-Producte.
b) Phosphorescenz	{ Bologneser Stein; Cantons Leuchtstein und andere Sulphide alkalischer Erden; einige Diamanten etc.
3. Thermo-Luminescenz	Flusspath; Schwerspath.
4. Tribo-Luminescenz	{ Diamanten; Zucker; Quarz; Urannitrat; Pentadecylparatolyketone.
5. Elektro-Luminescenz	{ Viele verdünnte Gase; viele der fluores- cirenden und phosphorescirenden Körper. Unter dem Einfluss der Kathodenstrahlen werden zur Luminescenz erregt: Glas, Diamanten und viele Mineralien.
6. Krystallo-Luminescenz	Arsenige Säure.
7. Lyo-Luminescenz	Subchloride alkalischer Metalle.
8. X-Luminescenz	Platincyanüre; Schwerspath etc.

Die chemische Luminescenz, welche an der Spitze der Tabelle steht, schliesst alle jene Fälle ein, bei denen die Emission kalten Lichtes mit chemischen Veränderungen verbunden ist. Das bekannteste Beispiel ist das Leuchten des Phosphors bei langsamer Oxydation im Dunklen. Zum Beweise dessen nimmt man ein Stück matt geätztes Glas, taucht es in warmes Wasser und schreibt auf seine rauhe Oberfläche mit einem Stück Phosphor, den man aus Fürsorge mit einem feuchten Tuche anfasst. Ich habe ein solches Glas präparirt, und Sie sehen, mit welch schönem schwachblauen Schimmer dasselbe beim Verdunkeln des Saales leuchtet. In wenigen Minuten wird der Ueberzug von Phosphor oxydirt sein und dann ist die Lichtemission zu Ende. Merkwürdig genug ist es, dass dieses Licht nicht nur aus

den blauen Wellen besteht, welche Sie sehen können, sondern auch noch unsichtbare Wellen enthält, die photographische Wirkungen besitzen und ähnlich den Röntgenstrahlen eine in schwarzes Papier eingewickelte photographische Platte belichten.

Es ist heutzutage zweifellos, dass die Lichtemission im Dunkeln der Glühkäfer und Feuerfliegen sowohl wie das Meeresleuchten bzw. das Leuchten vieler Tiefseefische zur Klasse der Chemi-Luminescenz gehört. Gleicher Natur ist ferner das von den Mikroben ausgesendete Licht, welches beim Verfaulen von Holz und anderen Organismen entsteht. In allen diesen Fällen ist eine chemische Zersetzung die Ursache des Leuchtens.

Unter die Rubrik Photo-Luminescenz gehören alle jene Fälle, in denen Körper kaltes Licht aussenden, falls sie von Lichtwellen getroffen werden. Hier sind zwei Fälle zu unterscheiden. Bei der „Fluorescenz“ währt die Lichtemission nur so lange wie die Einwirkung des Lichtes anhält; bei der „Phosphorescenz“ überdauert die Lichtemission die Zeit der Lichtreizung. Das älteste Beispiel von Phosphorescenz ist das des berühmten Bologneser Leuchtsteines. Ein Schuhmacher in der Stadt Bologna Namens Casciarole machte im Jahr 1602 die Erfindung, eine Steinart herzustellen, welche im Dunklen Licht aussendet, falls man sie vorher dem Licht ausgesetzt hatte. Er erreichte¹⁾ dies durch eine Calcination des Schwerspaths (Bariumsulfats), welcher in der Nähe der Stadt gefunden wurde. Hier habe ich ein kleines Stück davon. Seit jener Zeit sind eine Menge anderer Substanzen bekannt geworden, denen dieselbe Eigenschaft zukommt. So phosphoresciren, wie Robert Boyle fand, verschiedene Diamanten, während unter den künstlichen Substanzen Calciumsulfat (Cantons Leuchtstein) und Strontiumsulfat diese Eigenschaft in hohem Grade besitzen. Calciumsulfat erhält man dadurch, dass man Austernschalen pulverisirt und das mit ein wenig Schwefel gemischte Pulver in einem Schmelztiegel bis zur Rothgluth erhitzt. Das Hinzufügen von geringen Mengen anderer Substanzen (z. B. Wismuth, Kupfer, Mangan) hat einen bemerkenswerthen Einfluss auf Entstehung und Aenderung der Farben des Phosphorescenz-Lichtes. Die zur Herstellung Balmainscher Leuchtfarbe benutzte Substanz besteht der Hauptsache nach aus Calciumsulfat und einer Spur Wismuth. Von allen diesen

1) Siehe eine kleine 1680 in Rom publicirte Schrift von Marcio Antonio Cello mit dem Titel: Il fosforo, o'vero la pietra Bolognese, preparata per rilucere frà l'ombra.

künstlichen Präparaten ist bei Weitem das beste und kräftigste die neue von Herrn Horne dargestellte Lumineszenzfarbe.

Die hinter mir befindliche elektrische Lampe ist so aufgestellt, dass sie ein Lichtbüschel abwärts in eine Röhre sendet. Die auf dem Boden der Röhre befindlichen phosphorescirenden Substanzen werden so während einiger Minuten der Lichtwirkung ausgesetzt. Zunächst ist hier ein Stückchen des Bologneser Leuchtsteins. Entferne ich es aus dem Lichtstrahl, so leuchtet es im Dunkeln, wenn auch nicht annähernd so hell, wie das neue Material von Horne, welches pro Quadratzoll der exponirten Oberfläche ebensoviel Licht aussendet, wie der zehnte Theil einer Kerze. Ich habe gehört, dass man sogar den Leuchtkäfer benutzt haben soll, um bei Nacht lesen zu können.

Hier habe ich einen Diamantring mit fünf feinen Steinen. Setze ich denselben nur eine Minute lang dem Licht aus und bringe ihn dann ins Dunkle, so scheinen zwei der Steine wie kleine Glühkäfer zu leuchten. Ferner sind hier eine Reihe von Glasröhren, in denen sich je ein weisses Pulver befindet. Alle diese Pulver phosphoresciren. Freilich müssen sie erst dem Licht ausgesetzt werden, denn jetzt leuchten sie noch nicht. Wir wollen sie nur 30 Secunden den Strahlen der Bogenlampe aussetzen. Bringen wir sie sodann in die Finsterniss des Saales, so sehen wir sie in allen Farben des Regenbogens leuchten.

Hier habe ich eine grosse, mit Leuchtfarbe bestrichene Glas-tafel. Ich lege meine Hand darauf und setze sie so eine Minute lang den Strahlen der Bogenlampe aus. Nach dem Ausschalten der Lampe sehen Sie die ganze Glastafel in glänzendem Lichte leuchten, ausser da, wo der Schatten meiner Finger als schwarze Silhouette erscheint. In diesem Falle ist die Luminescenz von schöner blauer Färbung. Wenige Minuten später während des Verschwindens wird sie weisser; aber dieses schwache Leuchten hält die ganze Nacht an und nach Verlauf einer so langen Zeit ist noch immer nicht alle Lichtenergie verausgabt. Selbst wenn man ein mit Leuchtfarbe bestrichenes Blatt sechs Wochen im Dunkeln aufbewahrt hat, sendet es noch Wellen aus, welche auf eine photographische Platte einwirken.

Nimmt man ein mit Leuchtfarbe bestrichenes Blatt, welches dem Licht ausgesetzt gewesen, dessen Phosphorescenz aber schon abgestorben ist, so kann man dasselbe durch blosses Erwärmen wieder zu hellerem Leuchten bringen. Hier habe ich ein solches Blatt; lege ich meine Hand auf die Rückfläche desselben, so sehen

Sie, wie es da, wo es erwärmt wird, helleres Licht auszusenden anfängt. Kühlt man umgekehrt das mit Leuchtfarbe bestrichene Blatt ab, während es phosphorescirt, so stirbt auch sein Licht langsam ab und nimmt wieder zu, sobald man es erwärmt. Professor Dewar hat die merkwürdige Entdeckung gemacht, dass viele Substanzen, welche bei gewöhnlichen Temperaturen nicht phosphoresciren, diese Eigenschaft erlangen, wenn man sie in flüssiger Luft auf eine Temperatur von 79 Grad unter Null abkühlt. Auf solche Weise hat er in diesem Saale gezeigt, dass Gegenstände, wie Federn, Elfenbein und Papier in hohem Grad phosphorescirend werden, wenn man sie auf jene tiefen Temperaturen abkühlt. Erst in Folge dieser Abkühlung scheinen sie die Eigenschaft zu erwerben, Licht zu absorbiren und aufzuhäufen, um dasselbe beim Erwärmen wieder auszustrahlen. Die Analogie zwischen den Eigenschaften dieser Substanzen und denjenigen der Leuchtfarben ist ziemlich gross. Ein Blatt Papier mit Leuchtfarbe, welches vorher belichtet und später abgekühlt worden ist, gleicht einer Aladinschen Zaubерlampe; man braucht es nur mit der Hand zu erwärmen und es leuchtet.

Damit gelangen wir zur dritten Art von Luminescenz in unserer Tabelle, zur Thermo-Luminescenz. Der Name drückt die Eigenschaft vieler Mineralien, besonders der grünen Arten von Flusspath aus, bei Erhitzung im Dunkeln zu leuchten. Ueber einem grossen Bunsenbrenner ist ein viereckiges Stück Eisenblech nahe bis zur Rothgluth erwärmt worden. Auf dieses im Dunkeln unsichtbare heisse Blech streue ich aus einer Pfefferbüchse einige feine Körner von gestossenem Flusspath. Sobald sie sich erhitzen, fangen sie wie kleine Glühkäfer zu leuchten an. Sie leuchten in dieser glänzenden Weise wenige Minuten, dann erblassen sie, um stundenlang einen schwachen Lichtschimmer zu verbreiten. Nachdem sie aber einmal erhitzt worden sind, scheinen sie ihren Lichtvorrath für immer verloren zu haben, denn zum zweiten Male erwärmt, werden sie nicht wieder luminescirend.¹⁾

Der Ausdruck Tribo-Luminescenz, welcher zunächst auf der Tafel folgt, bezieht sich auf die Erzeugung von Luminescenz durch

1) Viele andere Mineralien haben ähnliche Eigenschaften. In vielen Fällen kann die Thermo-Luminescenz durch erneute Exposition gegen Licht oder durch elektrische Funken oder mit Hülfe der Kathodenstrahlen wieder geweckt werden. Wiedemann hat künstliche Substanzen gefunden, die ebenfalls Thermo-Luminescenz zeigen, insbesondere ein Präparat von Calciumsulfat, welches eine geringe Menge Mangansulfat enthält.

Reibung. Es existirt ein sehr einfaches Experiment, welches Sie zu Hause ohne jeden Apparat ausführen können. Zerbrechen Sie ein Stück Zucker in einem vollkommen dunklen Zimmer. Im Moment des Zerbrechens sendet es ein schwaches Licht aus. Ebenso verhalten sich Krystalle von Urannitrat, wenn man sie in einer Flasche schüttelt oder in einem Mörser zerreibt. Lassen Sie mich dies Experiment Ihnen in grossem Massstabe vorführen. Hier habe ich ein grosses Stück eines Quarzkrystalls, welches nahe 100 Pfund wiegt. Die eine der Flächen ist fast eben. Ich werde jetzt ein kleineres Quarzstück nehmen und dasselbe auf dem grösseren Krystall hin- und herreiben. Sie sehen wohl alle die glänzenden Lichtblitze, welche während der Operation vom Quarz ausgehen.

Indem ich mir die Besprechung der durch elektrische Entladungen hervorgerufenen Luminescenz für meine letzte Vorlesung vorbehalte, kehre ich jetzt zu den Eigenschaften der ultravioletten Strahlen zurück. Eine Wirkung, welche sie vor allen anderen Lichtwellen voraus haben, besteht in der von Hertz entdeckten Eigenschaft, elektrisch geladene Körper durch die Bestrahlung zu entladen. Freilich erfährt diese Wirkung eine eigenthümliche Einschränkung.

Besteht der elektrische Körper aus einer von Luft umgebenen Metallplatte, so tritt beim Bestrahlen durch das violette Licht nur dann eine Entladung ein, wenn ihre Oberfläche negativ geladen war, nicht aber bei positiver Ladung.¹⁾

Wir können uns leicht von dieser Erscheinung Rechenschaft geben. Hier sehen Sie ein Elektroskop, dessen zwei Aluminiumblättchen auf je einer Seite eines centralen Aluminiumblattes montirt und in eine dünne Glasflasche eingeschlossen sind (Fig. 92.) An der Spitze des Stabes ist eine Scheibe aus Zinkblech befestigt, welche mit ein wenig Natriumamalgam frisch gereinigt worden ist. Sie ist um 45 Grad gegen die Verticale geneigt, weil bei diesem Einfallswinkel der Strahlen die Resultate am günstigsten sind. Ich halte in die Nähe der Zinkscheibe einen geriebenen Glasstab und berühre die Platte, während sie unter dem Einfluss der positiven Ladung des Glasstabes steht. Das Elektroskop erhält dann durch Influenz

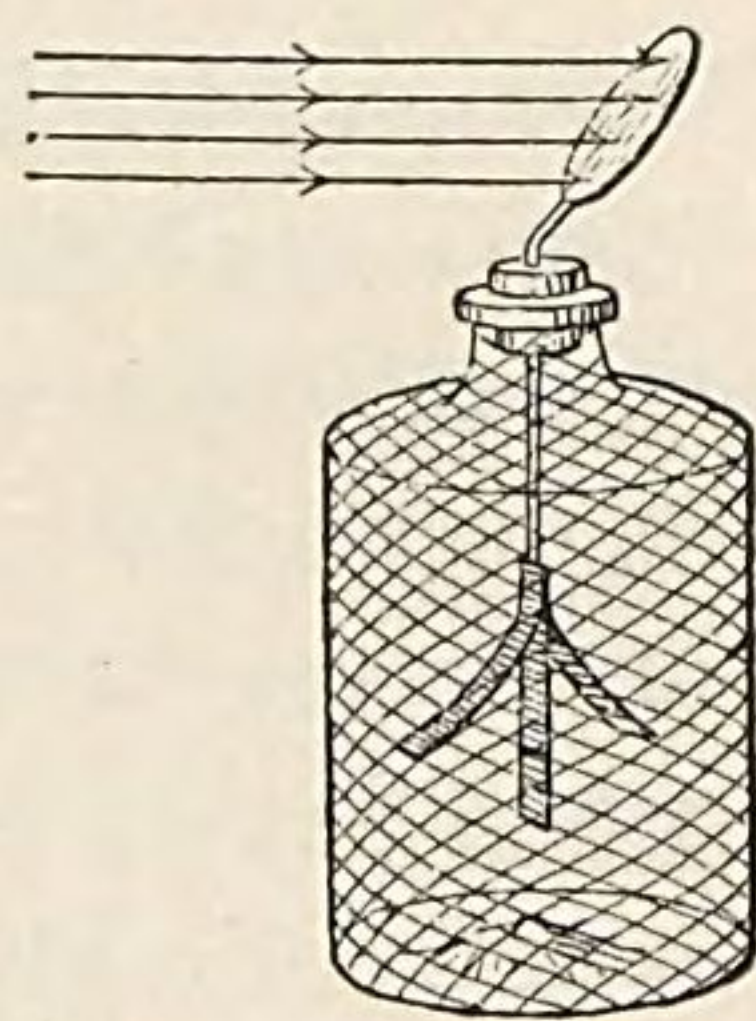


Fig. 92.

1) Ich habe jedoch gefunden, dass eine von Wasserstoffgas umgebene Oberfläche von Bleisuperoxyd auch entladen wird, wenn ihre elektrische Ladung positiv war.

eine negative Ladung und die Aluminiumblättchen streben nach aussen, einen grossen Winkel miteinander bildend. Werfe ich jetzt ein Büschel ultravioletter Strahlen auf die Scheibe, so fallen die Blättchen plötzlich wieder zusammen. Nur wenn das Elektroskop positiv geladen ist, behalten die Blättchen auch bei der Bestrahlung ihre schiefe Lage bei. Uebrigens sind auch die Strahlen der Sonne und die längeren Wellen des sichtbaren Spectrums activ, wenn man sie auf eine reine Oberfläche von Natrium strahlen lässt.¹⁾

Die verschiedenen Arten von Lichtwellen haben also verschiedene photo-elektrische Wirkungen, wie sie auch mit verschiedenen photo-chemischen Kräften ausgestattet sind.

Beim Beginn dieser Vorlesung habe ich die photographische Wirkung der Lichtwellen besprochen, und ich kehre nun zu diesem Thema zurück, um das Problem zu behandeln, welches kürzlich so grosses Interesse unter den Photographen erregt hat, nämlich die Photochromie oder die Photographie in Farben. Viele Versuche sind gemacht worden, um die Bilder der Gegenstände in ihren natürlichen Farben hervorzubringen. Alle Hoffnungen waren aber vergebens, so lange die Photographen mit Platten hantirten, welche für unsichtbares, ultraviolettes Licht empfindlicher waren, als für das sichtbare. Beim alten Collodiumverfahren bewirkte nämlich die grössere Empfindlichkeit der Platten gegen blaue und violette Strahlen und deren geringere Empfindlichkeit gegen rothe und gelbe Strahlen, dass alle photographischen Bilder farbige Objecte in Bezug auf das Helligkeitsverhältniss der verschiedenen Farben unwahr wiedergaben. Es war eine alte Klage, dass Blau wie Weiss und Roth wie Schwarz wirkte. Die ersten Schritte, diesem Uebelstande abzuhelfen, rühren von H. W. Vogel (1873) und Abney her. Diese Entdeckungen laufen darauf hinaus, die photographischen Platten durch Baden in Farbstoffen (Sensibilisatoren) auch für die längeren Wellen des Spectrums empfindlich zu machen. Hierdurch erhielt man die „orthochromatischen“ Platten, welche Bilder geben, bei denen die Farben fast ihrem natürlichen Helligkeitsverhältniss gemäss wirken. Eine ideale orthochromatische Platte sollte die verschiedenen Farben des Spectrums in demselben Intensitätsverhältniss wiedergeben, in welchem die Spectralfarben unserem Auge erscheinen.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Näheres über diese interessanten, von Elster und Geitel zuerst mit Sonnenlicht angestellten Versuche siehe in Wiedemanns Annalen, Bd. 38 1889 und Bd. 41 1890.

Mittels der orthochromatischen oder farbenempfindlichen Platten erhalten wir aber von einem farbigen Object noch kein farbiges Bild. Um dieses hohe Ziel zu erreichen, die Farben der Gegenstände auf photographischem Wege festzuhalten, bedient man sich zweier ganz verschiedener Methoden. Die indirecte Methode der Herstellung farbiger Photographien erheischt drei Aufnahmen, durch deren Zusammenwirkung erst die Farben im Bilde zum Ausdruck gebracht werden. Ihr liegt eine von Clerk Maxwell 1861 erdachte und vom Baron Ranconnet 1865 unabhängig davon ausgesprochene Idee zu Grunde, deren Durchführung freilich erst durch die H. W. Vogelsche Entdeckung der Sensibilisatoren ermöglicht worden ist.¹⁾

In der Young-Helmholtzschen Farbentheorie werden alle Farbenempfindungen wie in der zweiten Vorlesung auf S. 55 ausführlich dargethan worden ist, auf nur drei einfache oder primäre Empfindungen zurückgeführt, da, wie leicht gezeigt werden kann, alle Erscheinungen des Farbensehens durch das Zusammenwirken von drei Farben erhalten werden können. Diese drei Grundempfindungen sind Roth, gesättigtes Grün, dem Gelbgrün sich nähernd und Blau-Violett. Könnten wir also von einem Gegenstande drei Aufnahmen machen, jede Aufnahme entsprechend mit Licht je einer der drei Grundfarben, könnten wir jede Aufnahme mit Licht der entsprechenden Farbe beleuchten und alle drei Bilder zur Deckung bringen, so müssten wir eine Reproduction des Gegenstandes in seinen natürlichen Farben erhalten. Will man auf Grund dieser Theorie farbige Bilder durch Druck herstellen, so muss man die drei Aufnahmen photolithographisch übertragen und unter Anwendung entsprechend gewählter Farben auf demselben Blatt über einander drucken. Diese von Jos. Albert in Deutschland mit Erfolg eingeführte Dreifarbenmethode (Albertotypie) wurde wesentlich verbessert, als H. W. Vogel für jede Platte einen besonderen Sensibilisator und als Druckfarbe eine solche wählte, welche spectroscopisch möglichst mit der Farbe des Sensibilisators übereinstimmte. Diese Methode wird gegenwärtig von der Gesellschaft für Naturfarbendruck in Berlin ausgeübt und von Albert in München für den Zinkdruck angewendet.

Ich gehe jetzt dazu über, Ihnen die auf dieser Theorie beruhenden Erfolge zu zeigen, welche Herr Ives mit seinem Photo-

1) Dieser Absatz ist ebenso wie die zweite Hälfte des nächstfolgenden vom Uebersetzer eingefügt worden.

chromoskop erzielt hat. Gemäss der Dreifarben-Methode suchte Herr Ives Farbenfilter herzustellen, welche für jede der drei Grundempfindungen alle jene Wellen des Spectrums hindurchlassen, die gerade jene Empfindungen hervorrufen, und zwar in demselben Verhältniss, in welchem sie unser Auge erregen. So darf der Filter für Roth nicht allein rothes Licht hindurchlassen, sondern er muss alle jene Wellen hindurchlassen, welche Roth zu

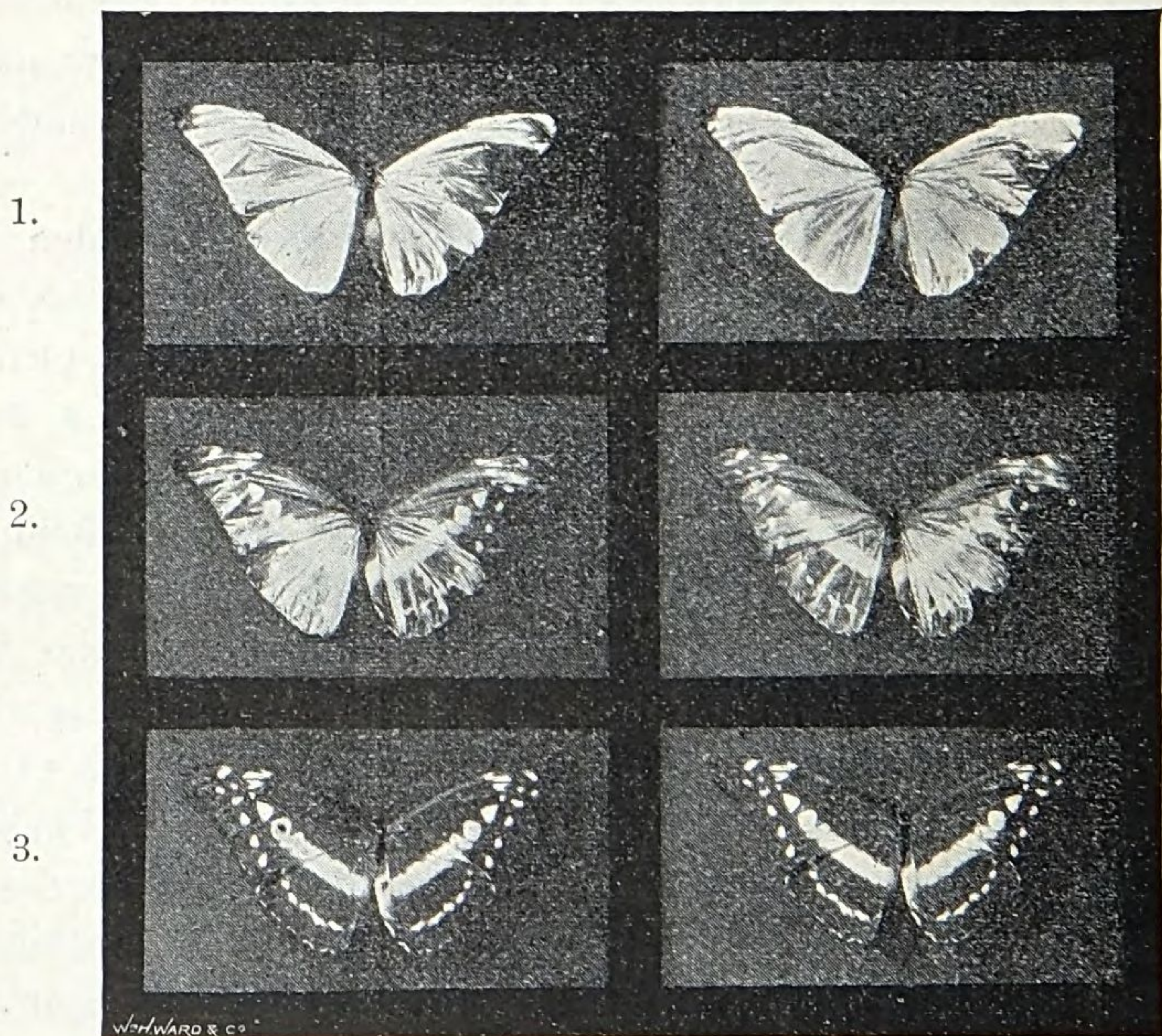


Fig. 93.

1. Ist zu erleuchten durch violett-blaues Licht. 2. Ist zu erleuchten durch grünes Licht.
3. Ist zu erleuchten durch rothes Licht.

erregen im Stande sind, freilich im gleichen Verhältniss, in welchem sie die rothen Empfindungen zu wecken im Stande sind. Die geeigneten Farben für die Farbenfilter auszuwählen, ist eine Sache von nicht geringer Geschicklichkeit und Erfahrung. Nachdem die Filter fertig sind, werden gleichzeitig durch drei solche Schirme (einen für Roth, einen für Grün und einen für Blau-Violett) drei Aufnahmen gemacht, und zwar nebeneinander auf einer einzigen orthochromatischen Platte. Von diesen drei Negativen (welche an sich natürlich farblos sind) werden drei Positive gedruckt. Auch diese sind farblos, aber sie zeigen Unterschiede entsprechend

den Farben der verschiedenen Theile des photographirten Gegenstandes. Fig. 93 ist ein dreifaches „Chromogramm“ eines Schmetterlings. Seine Seitenflügel, gekennzeichnet durch rothe und weisse Flecken auf schwarzem Grunde, zeigen überall einen herrlichen Glanz von schöner blauer Färbung. Das oberste von den drei Bildern ist dasjenige, welches mit blau-violettem Licht beleuchtet werden muss; das zweite ist dasjenige für grünes und das letzte das für rothes Licht. Jene Theile, welche als Weiss wiedergegeben werden sollen, sind in allen drei Bildern weiss. Jedes Bild ist ebenso wie der Druck an sich farblos, lediglich eine theils weisse, theils schwarze Niederschrift auf Glas.

Bringen wir jetzt diese drei farblosen Bilder in ein Instrument, sodass blau-violettes Licht durch das erste, grünes Licht durch das zweite und rothes Licht durch das dritte dieser getrennten Bilder geht und combiniren wir mit Hülfe geeigneter Spiegel diese drei Bilder so, dass das Auge sie gleichzeitig erblickt, dann entstehen die ursprünglichen Farben und wir sehen das Object im ganzen Glanz seiner natürlichen Farben.

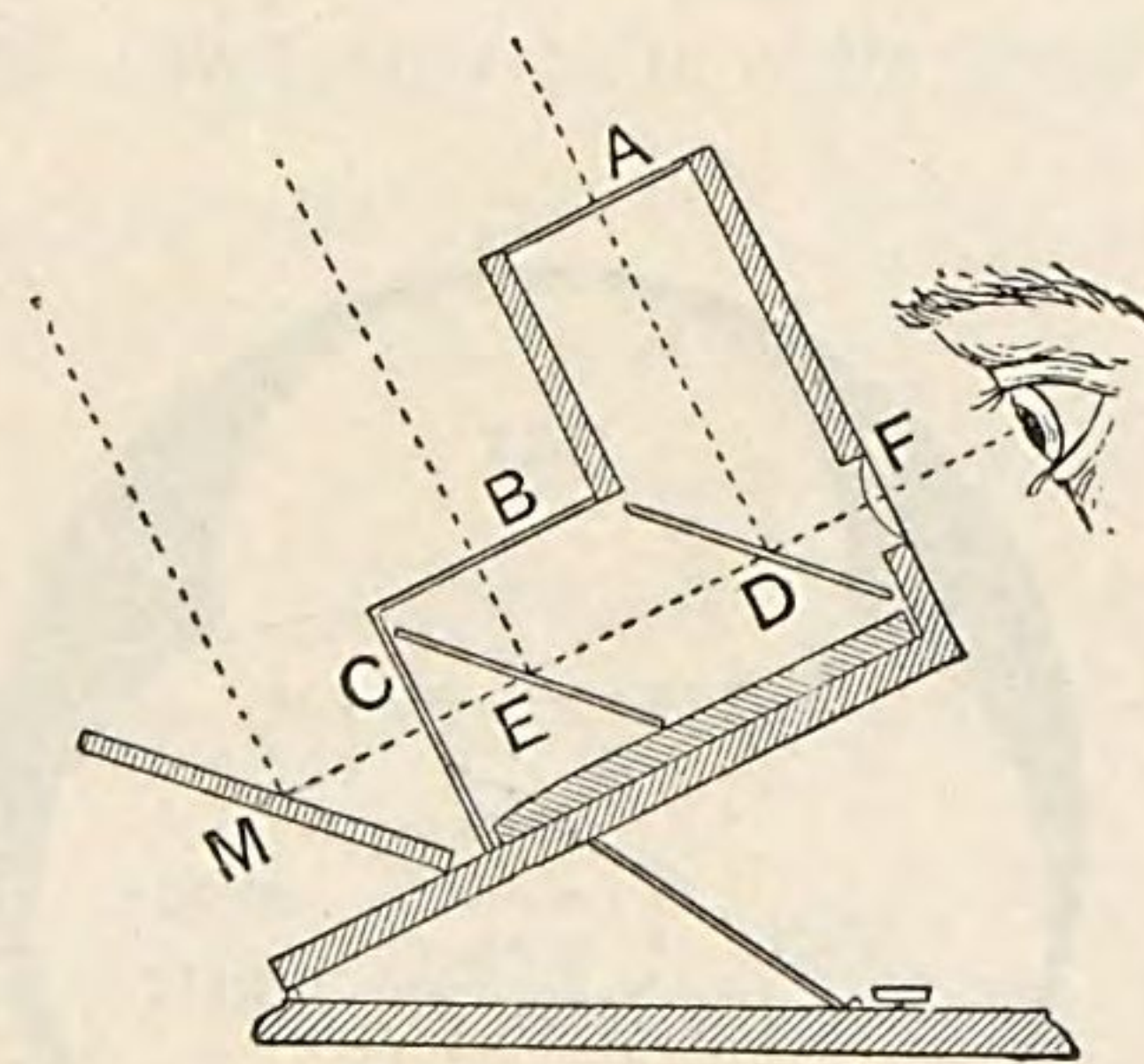


Fig. 94.

Das Instrument (Photochromoskop oder Chromoskop), welches Herr Ives gebaut hat, um diese dreifachen Photographien wieder zu vereinigen, steht vor Ihnen auf dem Tische. Fig. 94 giebt eine Vorstellung von seiner Construction.¹⁾ Herr Ives hat auch ein Projections-Photochromoskop mitgebracht, mit Hülfe dessen er einige dieser schönen Photographien auf dem Schirm projeciren wird. Das-

1) A, B und C sind rothe, blau-violette und grüne Gläser, auf welche die drei entsprechenden farbigen Photogramme gelegt sind. Die beiden Bilder bei A und B werden direct durch Licht von oben beleuchtet, das dritte C erhält sein Licht durch den schiefen Reflector M. Das rothe Bild wird gesehen mit Hülfe der Strahlen, welche an der Vorderseite eines schiefen, durchsichtigen Glasplattensatzes D gespiegelt wird. Das blau-violette Bild bei B sendet sein Licht auf einen zweiten schiefgestellten Glasplattensatz E, welcher es durch den Satz D hindurch in das Auge schickt. Das grüne Bild bei C wird durch beide Glassätze D und E hindurch gesehen. Die Linse F sammelt die Strahlen für das Auge, welches die drei Bilder so sieht, als ob sie übereinander lägen, und zwar alle in gleicher Entfernung vom Auge. Durch Binoculareinrichtung wird bewirkt, dass der Gegenstand nicht nur in seiner natürlichen Farbe erscheint, sondern auch körperlich gesehen wird.

selbe hat drei Mündungen, durch welche das rothe, das grüne und das blau-violette Bild gesondert auf dem Schirm entworfen und durch deren Uebereinanderlagerung die Farbencomposition erzeugt wird. Er zeigt uns zuerst die drei gefärbten Scheiben der Lichtkreise, jeden für sich getrennt, den rothen, den grünen und den blau-violetten. Dann bewegt er die Mündungen so, dass die drei Scheiben sich theilweise überlagern (Fig. 95). Wo sich Roth und Grün mischt, erhalten wir Gelb, wo sich Grün und Blau übereinander lagert, entsteht Blaugrün oder Cyanblau und wo Blau-violett und Roth sich decken, entsteht Purpur. Im Centrum, wo sich alle drei Farben übereinander lagern, entsteht Weiss. Beachten Sie bitte, dass stets die von zwei sich deckenden Farben erzeugte Mischfarbe

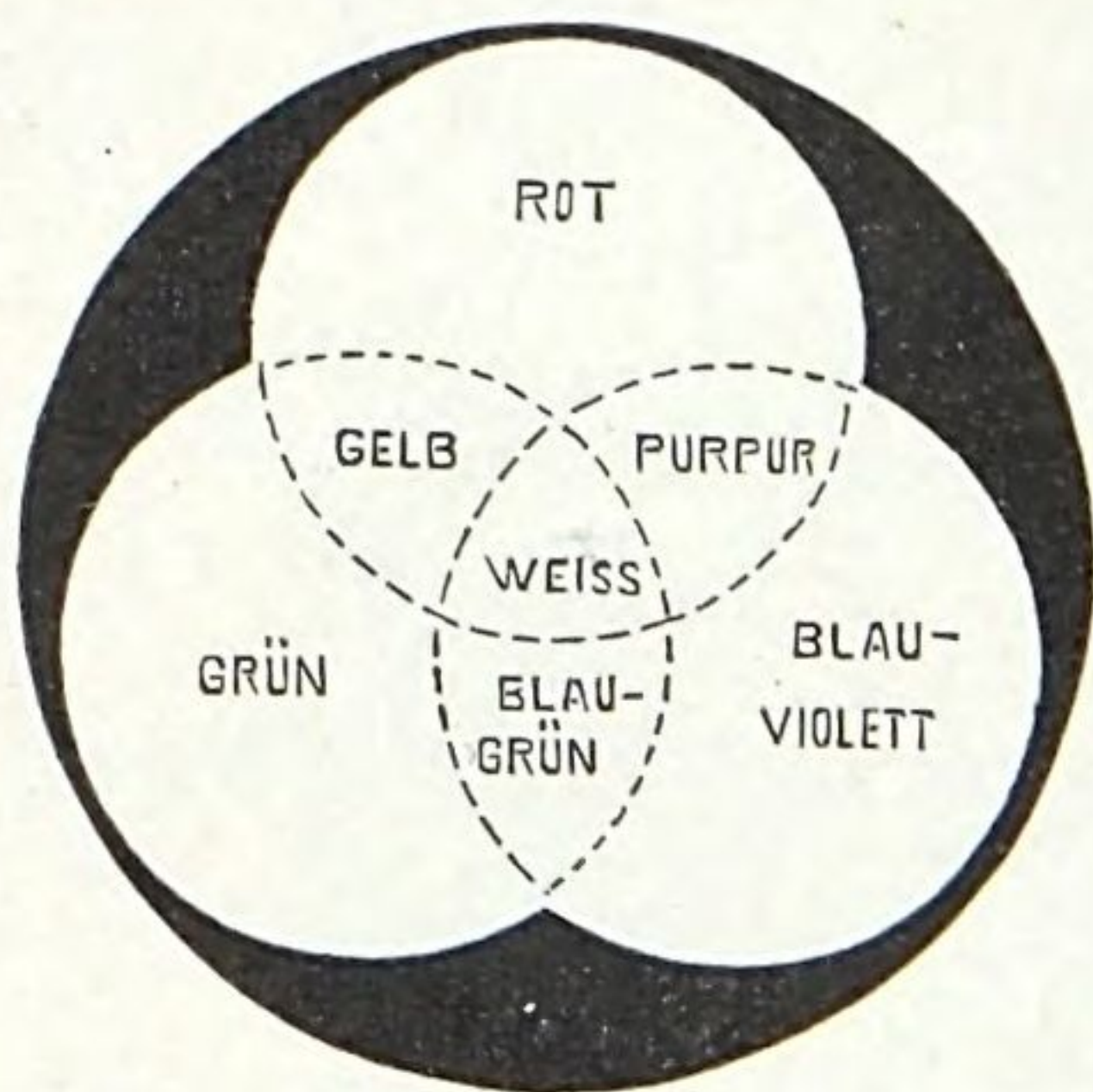


Fig. 95.

complementär ist zur dritten Farbe. So ist das Gelb complementär zu Blau-violett; Cyanblau ist complementär zu Roth und Purpur ist complementär zu Grün.

Diese drei Photogramme des Schmetterlings werden jetzt in das Chromoskop gelegt und ihre Bilder zur genauen Deckung gebracht. Der blaue Schimmer auf den Flügeln des Insekts wird mit wunderbarer Treue wiedergegeben. Kein Maler kann durch Pigmentfarben jemals

ein solch naturgetreues Bild auf die Wand zaubern. Hier ist ein Abbild eines Fruchtkorbes; beachten Sie die gelbe Citrone. Prüft man die einzelnen farbigen Bilder, so erkennt man, dass dieses Gelb durch die Mischung von Roth und Grün entsteht. Hier ist ein prachtvolles Blumenbouquet; die Farben sind ganz ausgezeichnet. Hier eine Cigarrenkiste, das natürliche Braun des Holzes zeigend und daneben ein Stück emaillirte Cloisonne mit all den feinen Schattirungen der verschiedenen dumpfen Farben in ihrem wahren gegenseitigen Verhältniss. Schliesslich sehen wir eine Schachtel Bonbons so natürlich abgebildet, dass man sie für wirklich essbar hält. Nach Allem bedarf es keines weiteren Beweises, dass durch geeignete Auswahl der Primärfarben schliesslich der Traum verwirklicht worden ist, dass man die Farbe der verschiedensten Gegenstände mittels der Photographie festhalten und reproduciren kann.

Wesentlich verschieden von der indirecten Photographie in Farben (Dreifarbenmethode) und ein höheres Ziel verfolgend, ist die

directe Methode der Herstellung farbiger Aufnahmen. Diese eigentliche Farbenphotographie ist erst vor wenigen Jahren von Professor Lippmann in Paris mit Erfolg wieder aufgenommen und zum Ziele geführt worden.¹⁾ Beim Lippmannschen Verfahren ist das Ideal erreicht, dass sich die Objecte direct farbig auf der Platte abbilden. Die erhaltenen ausserordentlich schönen und farbenglänzenden Bilder können freilich nicht vervielfältigt werden. Um sie herzustellen, lässt man Licht auf eine durchsichtige und lichtempfindliche Collodiumalbuminschicht fallen, die auf einer Quecksilberfläche liegt, sodass jeder Wellenzug während der Exposition in sich zurück gespiegelt wird. Da, wo die gespiegelten Wellen die einfallenden Wellenzüge treffen, entsteht Interferenz des Lichtes, und es bilden sich Lichtmaxima und Lichtminima im Innern der empfindlichen Gelatine, wobei die Wellenbäuche des Lichtes (Maxima) parallel zur Spiegelfläche in einem Abstand von genau einer halben Wellenlänge des benutzten Lichtes einander folgen. Es findet nun die chemische Wirkung hauptsächlich an diesen Wellenbäuchen statt, sodass sich daselbst Silberschichten ablagern.²⁾ Eine solche Platte giebt im reflectirten

1) Anmerkung des Uebersetzers: Die Theorie für das Zustandekommen eines directen farbigen Bildes auf der Platte ist von Dr. W. Zenker schon im Jahre 1868 in seinem Lehrbuch der Photochromie entwickelt worden.

2) Anmerkung des Uebersetzers: Diese stehenden Lichtwellen, deren Existenz von Dr. Zenker im Jahre 1868 vorausgesagt, von Professor Wiener im Jahre 1890 experimentell thatsächlich nachgewiesen wurde, entstehen, wie oben erwähnt, aus der Interferenz der einfallenden mit den an der Quecksilberoberfläche gespiegelten Strahlen. In Folge der maximalen Aetherschwingung an den Wellenbäuchen erleidet die empfindliche Schicht daselbst die lebhafteste chemische Zersetzung, während an den Knotenpunkten der Aether in Ruhe bleibt und in Folge dessen daselbst keine Ausscheidung metallischen Silbers stattfindet. War Roth das wirksame Licht, so lagern sich also Silberschichten parallel zur Spiegelebene im Abstände der halben Wellenlänge des rothen Lichtes von einander ab. Lässt man daher Licht gleicher Wellenlänge (also Roth) auf dieses System von Silberebenen der entwickelten Platte fallen, so werden die Lichtwellen an allen diesen Ebenen gespiegelt und die reflectirten Antheile treffen nach der Theorie der Farben dünner Blättchen (siehe S. 90 u. ff.) alle mit gleicher Phase zusammen, sodass sie durch Interferenz sich unterstützen; das gespiegelte Licht ist somit von gleicher Farbe wie das einfallende, d. h. Roth. Licht jeder anderen Wellenlänge wird aber mehr oder weniger durch Interferenz vernichtet, sodass vom auffallenden, weissen Lichte nur die rothen Strahlen vorzugsweise gespiegelt werden. Entwirft man also ein Spectrum auf der spiegelnden, lichtempfindlichen Schicht, so entstehen an jeder Stelle desselben Schaaren von Silberebenen, deren Abstand der halben Wellenlänge der wirksamen Farbe entspricht, sodass daselbst bei der fertigen Platte nothwendig auch die gleiche Farbe am meisten von allen

Licht betrachtet ein Bild, welches direct alle Farben des abgebildeten Gegenstandes zeigt. Hatte man auf der Platte ein Sonnenspectrum entworfen, so zeigt die fertige Platte im gespiegelten Licht ebenfalls ein Spectrum mit genau derselben Farbenfolge, welche das natürliche Spectrum besitzt. Eine solche Aufnahme des Spectrums, welche ich Herrn Professor Meldola verdanke, werde ich jetzt auf den Schirm projeciren. Sie sehen, dass wirklich alle Farben genau wiedergegeben sind. Neuerdings hat Professor Lippmann in diesem Saale die ausgezeichneten farbigen Photographien gezeigt, welche er von Landschaften, Stilleben und selbst vom menschlichen Gesicht erhalten hat.

anderen gespiegelt wird. Eine solche Platte zeigt demnach bei auffallendem weissem Lichte im reflectirten Lichte das farbige Spectrum. (Näheres siehe im Lehrbuch der Physik von Müller-Pouillet, 9. Aufl., Bd. II § 156, herausgegeben von L. Pfaundler und O. Lummer.)

Fünfte Vorlesung.

Das unsichtbare Spectrum (ultrarother Theil).

Wie man das unsichtbare ultraroth Licht vom sichtbaren trennt. Experimente über die Absorption und Transmission des unsichtbaren ultrarothern Lichtes. Es wird abgeschnitten durch das durchsichtige Glas, aber hindurchgelassen vom undurchsichtigen Ebonit. Gebrauch des Radiometers. Gebrauch der Thermosäule und des Bolometers. Farben als „Wärme-indicator“. Experimente über Reflexion, Brechung und Polarisation des unsichtbaren ultrarothern Lichtes. Entdeckung der Fortpflanzung elektrischer Wellen durch H. Hertz. Hertz'sche Wellen sind in Wirklichkeit Wellen unsichtbaren Lichtes von relativ bedeutender Grösse. Experimente über die Eigenschaften der Hertz'schen Wellen; deren Reflexion, Brechung und Polarisation. Folgerung, dass alle unsichtbaren Lichtwellen in Wirklichkeit elektrische Wellen verschiedener Grösse sind.

Heute beschäftigen wir uns mit jenen Wellen des unsichtbaren Lichtes, welche an der Seite des rothen Endes des Spectrums liegen. Sie sind deshalb unserem Auge unsichtbar, weil ihre Wellenlängen grösser sind als irgend eine der das Auge reizenden Lichtwellen oder anders ausgedrückt, weil sie eine kleinere Schwingungszahl haben als die von unserem Auge als Licht empfundenen Wellen.

Während die ultravioletten Wellen eine kleinere Wellenlänge und eine grössere Schwingungszahl im Vergleich zu den sichtbaren Strahlen besitzen und in Folge dessen nicht durch das Auge, sondern nur durch ihre chemische, luminescirende und entelektrisirende Wirkung erkannt werden können, muss die Existenz der ultrarothern Wellen von längerer Wellenlänge und geringerer Schwingungszahl durch ihre Wärmewirkungen nachgewiesen werden: Sie erwärmen die von ihnen bestrahlten Objecte. Aus diesem Grunde werden sie meist als „Wärme-Wellen“ bezeichnet, während das unsichtbare „Licht“ dieser Art unter dem Namen „strahlende Wärme“ bekannt ist.

Aber wenn, wie ich Ihnen noch zeigen werde, diese sogenannte „strahlende Wärme“ mit Ausnahme der Sichtbarkeit alle physikalischen Eigenschaften der Lichtwellen besitzt, d. h. wenn wir sie reflectiren, brechen, dispergiren, beugen und polarisiren können, dann sind wir logisch gezwungen, sie in Wirklichkeit als eine Art

von Licht¹⁾ aufzufassen. (Vergl. hierzu die vom Uebersetzer S. 103 gemachte Bemerkung.)

Kurz, das Spectrum dehnt sich zu beiden Seiten des sichtbaren Theiles aus; an der Seite des Violett liegen die „chemischen“ Strahlen, an der Seite von Roth die „Wärmestrahlen“.

Finden Sie, dass das Licht der Sonne oder irgend einer Flamme die von ihm bestrahlten Objecte erhitzt, so werden Sie sich zunächst wohl fragen, welche der im Strahlenbüschel enthaltenen Wellen die Wärmewirkung hervorbringen. Um diese Frage zu beantworten,

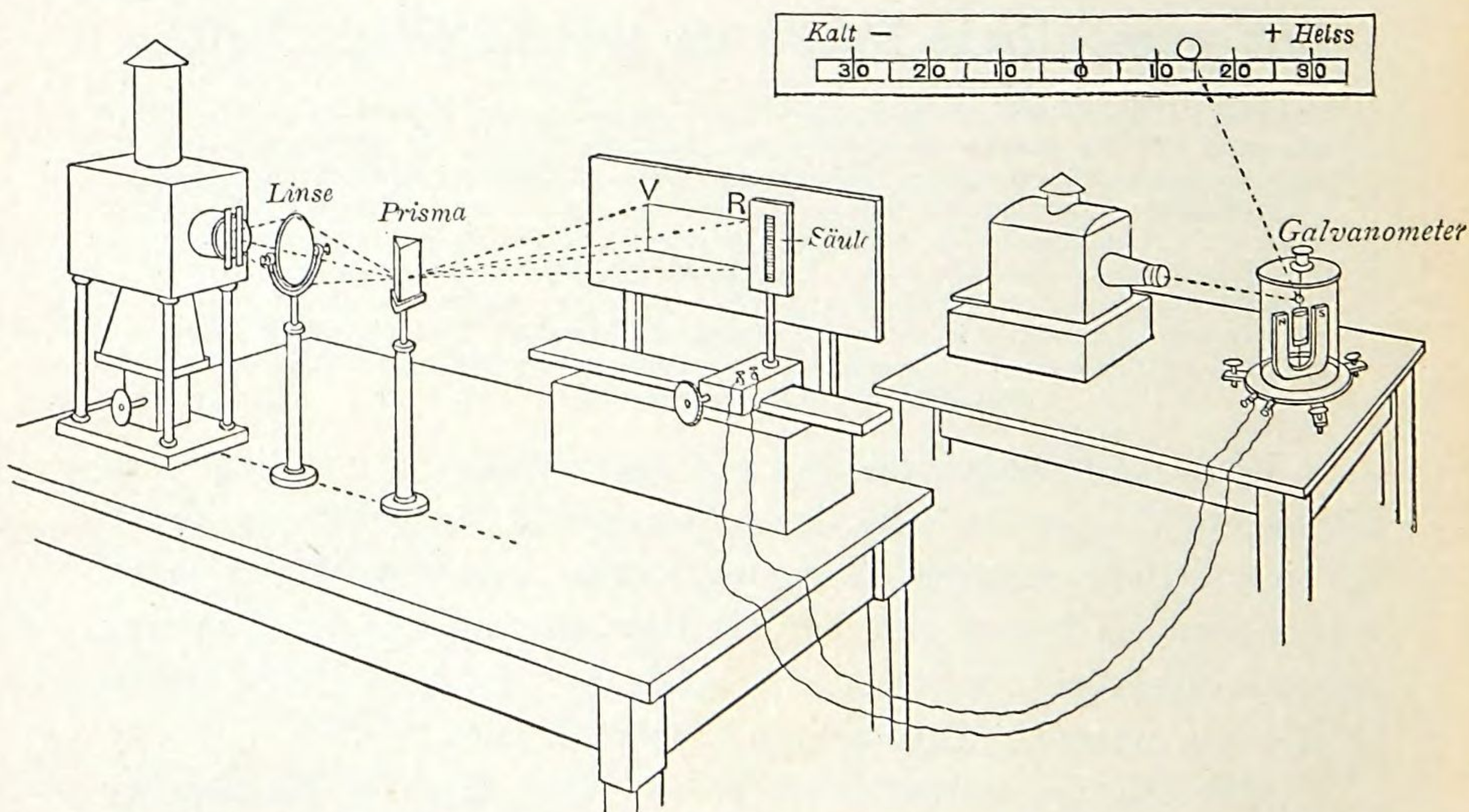


Fig. 96.

müssen wir zunächst das Licht in ein Spectrum ausbreiten, um sodann mit Hülfe eines empfindlichen Apparates ausfindig zu machen, welcher Theil desselben den grössten Wärmeeffect ausübt.

Die allerersten Untersuchungen des Spectrums in Bezug auf Wärmestrahlen wurden so angestellt, dass man die geschwärzte Kugel eines gewöhnlichen Thermometers in die verschiedenen Theile des Spectrums brachte. Es wurde so gefunden, dass der Wärmeeffect

1) Ein anderer, viel gebrauchter Ausdruck ist „Strahlung“. Dieser Ausdruck ist zu verwerfen, denn das Wort „Strahlung“ sollte nicht in zweierlei Bedeutung gebraucht werden. Wenn es wirklich für den „Akt der Strahlung“ benutzt wird, dann sollte ein anderer Ausdruck für das gebraucht werden, was ausgestrahlt wird, nämlich die Wellen.

im äussersten Roth des sichtbaren und hauptsächlich im ultrarothern, unsichtbaren Theil des Spectrums auftritt.

Das auf dem Schirm entworfene Spectrum (Fig. 96 a. v. S.) ist wiederum wie in früheren Fällen dadurch hervorgebracht, dass man vor die Oeffnung der Projectionslampe einen Spalt setzt, von diesem Spalt mit Hülfe einer Linse auf dem Schirm ein Bild entwirft und in den Strahlengang ein Prisma einfügt, welches die weissen Strahlen in ihre einzelnen farbigen Bestandtheile auflöst.

Unser Spectrum heute ist weder so hell noch so lang, wie Sie es bei früheren Gelegenheiten gesehen haben, und zwar deshalb, weil wir gezwungen sind, statt der Glaslinse und des Glasprismas

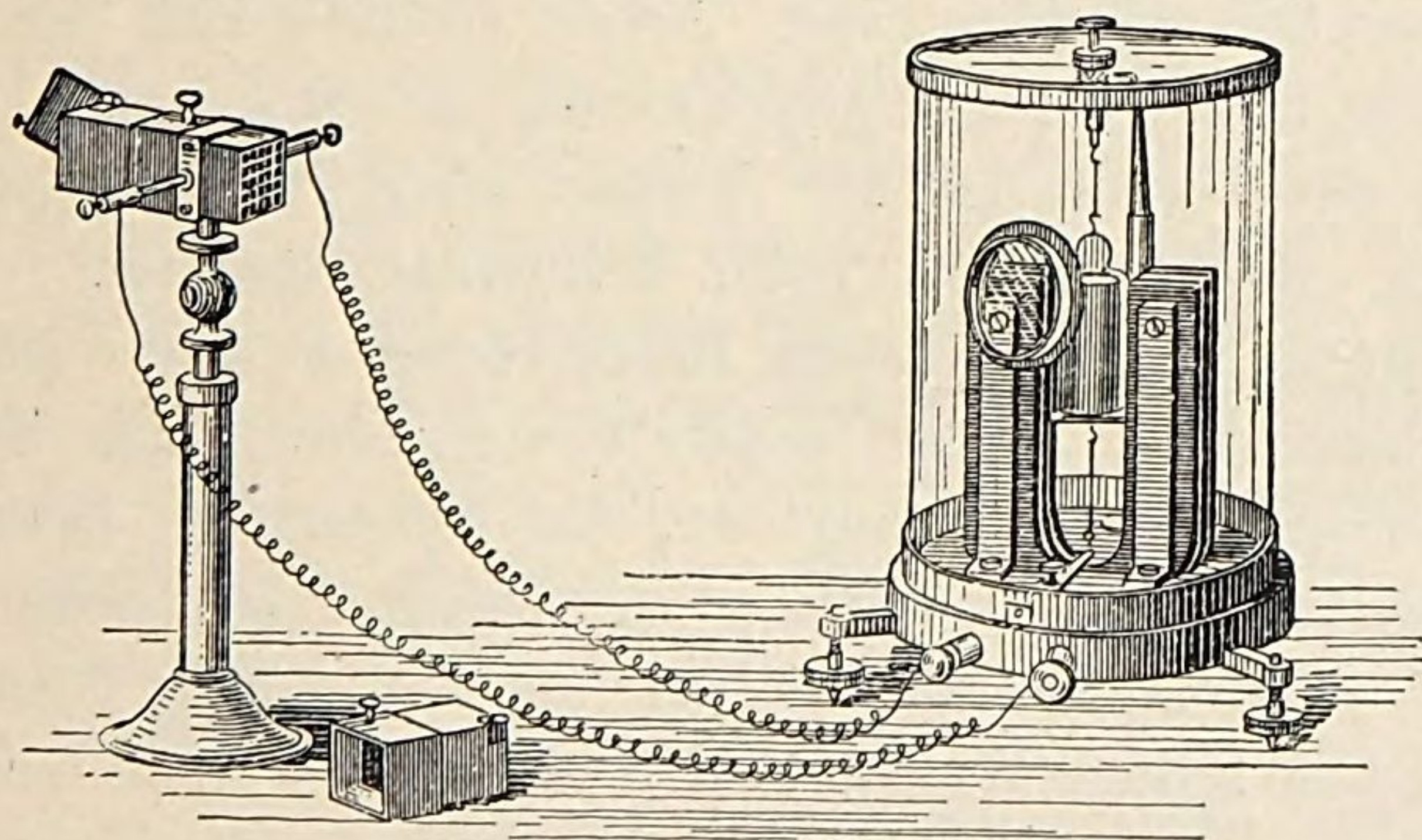


Fig. 97.

solche aus Steinsalz anzuwenden. Dieses Material ist aber weniger brechend und hat eine geringere Dispersion als Glas.

Wir wollen uns jetzt durch das Experiment davon überzeugen, dass der Heizeffect den längsten Wellen, d. h. denjenigen am rothen und ultrarothern Theile des Farbenbandes eigen ist.

Wegen der geringen Empfindlichkeit des gewöhnlichen Thermometers bediene ich mich einer Art elektrischen Thermometers, der „Thermosäule“. Wenn Sie dieses Instrument genauer kennen lernen wollen, müssen Sie freilich auf elektrische Abhandlungen zurückgreifen. Was ich über dasselbe zu sagen habe, beschränkt sich einfach darauf, dass es ein ausserordentlich gegen Hitze empfindliches Instrument ist (Fig. 97), welches Veranlassung zur Entstehung eines elektrischen Stromes giebt, sobald seine Oberfläche von Wärmestrahlen getroffen wird. Der so erzeugte elektrische Strom wird in ein Galvanometer geleitet, dessen Spiegel die Strahlen einer Bogenlampe auf jene Scala an' der Wand reflectirt und daselbst einen Lichtfleck erzeugt. Nehmen Sie es gläubig hin, dass jener

Lichtfleck durch seine Lage anzeigt, ob die Oberfläche der Thermosäule wärmer oder kälter ist als die Zimmerluft. Ist sie wärmer, so bewegt sich der Fleck nach rechts (+), ist sie kälter, so wandert der Lichtfleck nach links (—).

Das Spectrum fällt jetzt auf einen Schirm aus Messing mit einem Schlitz, hinter welchem sich die Thermosäule befindet, und zwar ist es der ultraviolette Theil des Spectrums, welcher durch den Schlitz geht und die Oberfläche der Thermosäule trifft. Aber da gleichwohl der Lichtfleck beim Nullpunkt verharret, so folgt, dass die ultravioletten Wellen keine merkliche Wärmewirkung hervorbringen. Ich analysire nun das Spectrum, indem ich die Thermosäule langsam durchs Spectrum wandern lasse. Schon befindet sich der Schlitz im Violett, aber noch ist keine Heizwirkung zu erkennen. Desgleichen sehen Sie, dass, wenn ich den Schlitz durch Blau nach Grün und Gelb führe, der Lichtfleck beim Nullpunkt verharret. Alle diese Wellen bringen keine merkliche Heizwirkung hervor. Ich wandere mit der Thermosäule weiter, sodass Orange durch den Schlitz geht und Sie sehen, der Fleck fängt an, sich langsam zu bewegen. Die orangefarbenen Wellen erwärmen ein wenig. Ich gehe weiter zu Roth und der Fleck bewegt sich fast um den vierten Theil der Scala vorwärts. Die rothen Wellen heizen also bei Weitem mehr als die orangefarbenen. Und je weiter ich an das Ende des sichtbaren Roth komme, um so stärker wird die Wärmewirkung. In einer Entfernung jenseits des Roth, welche etwa ebenso gross ist, wie diejenige zwischen Roth und Grün im sichtbaren Spectrum, ist der Heizeffect am grössten, der Lichtfleck schiesst über die ganze Scala hinaus. Es geht daraus hervor, dass die Wellen, welche die grösste heizende Wirkung hervorbringen, ein wenig jenseits des sichtbaren Roth im ultrarothem, unsichtbaren Theile des Spectrums gelegen sind. In anderen Worten, die Wellen mit der grössten Heizwirkung haben eine grössere Wellenlänge als die äussersten rothen Strahlen des sichtbaren Spectrums. Nehmen wir die Grösse der äussersten rothen Wellen zu 820 Milliontel Millimeter ($820 \mu\mu$) an, so können wir die Länge dieser heissesten, unsichtbaren Wellen auf etwas über ein Tausendtel Millimeter schätzen.

Der unsichtbare Theil des Spectrums ist schon oft und durch viele Forscher untersucht worden. Langley konnte durch Benutzung des von Swanberg erfundenen „Bolometers“ Wärmewellen nachweisen, deren Wellenlänge $1\frac{1}{2}$ Hundertel Millimeter beträgt, d. h. diejenige der rothen Strahlen um das Zwanzigfache übertrifft. Pro-

fessor Rubens hat ultraroth Wellen von 0,024 mm Länge gemessen.¹⁾ Tragen wir diese Werthe in eine Scala nach Wellenlängen geordnet ein, so nimmt das ultraroth „Wärmespectrum“ ungefähr 50 mal so viel Raum ein als der sichtbare Theil des Spectrums. In der Sprache, welche bei der Darstellung musikalischer Intervalle gebräuchlich ist, umfasst das sichtbare Spectrum etwa eine Octave, insofern die äussersten ^{violet}rothen Strahlen doppelt so schnell schwingen als die äussersten ^{violet}violetten Strahlen, während die ultrarother Wellen mehr als fünf Octaven tiefer gehen und die ultravioletten um zwei Octaven über die sichtbaren violetten Strahlen hinausreichen (vergl. die Tabelle im Anhang zur vierten Vorlesung).

Unsere Thermosäule befindet sich jetzt in jenem Theile des Spectrums (ein wenig unterhalb des rothen Endes), bei welchem wir die grösste Heizwirkung festgestellt hatten. Um den Effect noch ein wenig zu steigern, will ich den Schlitz öffnen, damit eine grössere Menge dieser langen Wärmewellen auf die Thermosäule fällt. Nachdem wir so unseren Apparat gegen Wärmewellen möglichst empfindlich gemacht haben, wollen wir einige Versuche darüber anstellen, ob diese langen eine Heizwirkung erzeugenden Wellen auch fähig sind, die verschiedenen Substanzen zu durchsetzen, welche wir in Bezug auf gewöhnliches Licht geprüft haben.

Zuerst wollen wir ein Stück Fensterglas prüfen und sehen, ob die Wärmestrahlen durch dasselbe hindurchgehen. Dazu halte ich es vor den Schlitz und beobachte die vom Galvanometer und der Thermosäule angezeigte Wirkung. Sie sehen, dass das Glas zwar viel von der Wärme absorbirt, dieselbe aber doch nicht gänzlich vernichtet. Ein rothes Glas ist wirksamer als Fensterglas und ein blaues Glas wieder wirksamer als das rothe. Hier ist eine Krystallplatte aus Quarz; sie lässt, wie Sie sehen, mehr Wärmestrahlung hindurch, als alle die verschiedenen Gläser. Weiter habe ich hier eine ebenso dicke Platte aus Kalkspath; im Gegensatz zum Quarz absorbirt sie die Wärmestrahlen besser als alle bisherigen Substanzen. Schliesslich bringe ich noch eine Steinsalzplatte derselben Dicke in den Strahlengang, welche von einem grossen Krystall des gewöhnlichen Kochsalzes abgesägt und hierauf polirt worden ist. Sie sehen, dass Steinsalz sämtliche Wärmewellen durchlässt und von ihnen so gut wie nichts absorbirt. Uebrigens verhält sich Flusspath ebenso.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Neuerdings ist es den Herren Rubens und Nichols gelungen die Existenz von Wärmewellen nachzuweisen, welche über $\frac{1}{20}$ mm gross sind. (Näheres siehe im Anhang zur vierten Vorlesung.)

Ich habe hier also vier Substanzen — Glas, Quarz, Kalkspath und Steinsalz —, welche sämmtlich in Bezug auf das gewöhnliche Licht durchsichtig sind. Quarz ist, wie wir in der vorigen Vorlesung sahen, auch für die ultravioletten Strahlen von kürzester Wellenlänge so gut wie durchsichtig. Heute haben wir gesehen, dass Steinsalz eine der durchsichtigsten Substanzen in Bezug auf die langen Wärmewellen ist. Diese schon vor einem Jahrhundert gemachten Entdeckungen benutzten wir bei der Construction unseres Apparates. Die Linse und das Prisma, welche ich heute verwende, ist weder aus Glas noch aus Quarz hergestellt, sondern

aus Steinsalz. Da aber Steinsalz eine sehr geringe zerstreuernde Kraft in Bezug auf die sichtbaren Strahlen besitzt, so bringt es, wie schon erwähnt, auch nur ein ärmliches Farbenspectrum hervor, wenigstens im Vergleich zu dem Spectrum, welches ein Prisma von gleicher Grösse aus Glas oder Quarz erzeugen würde.

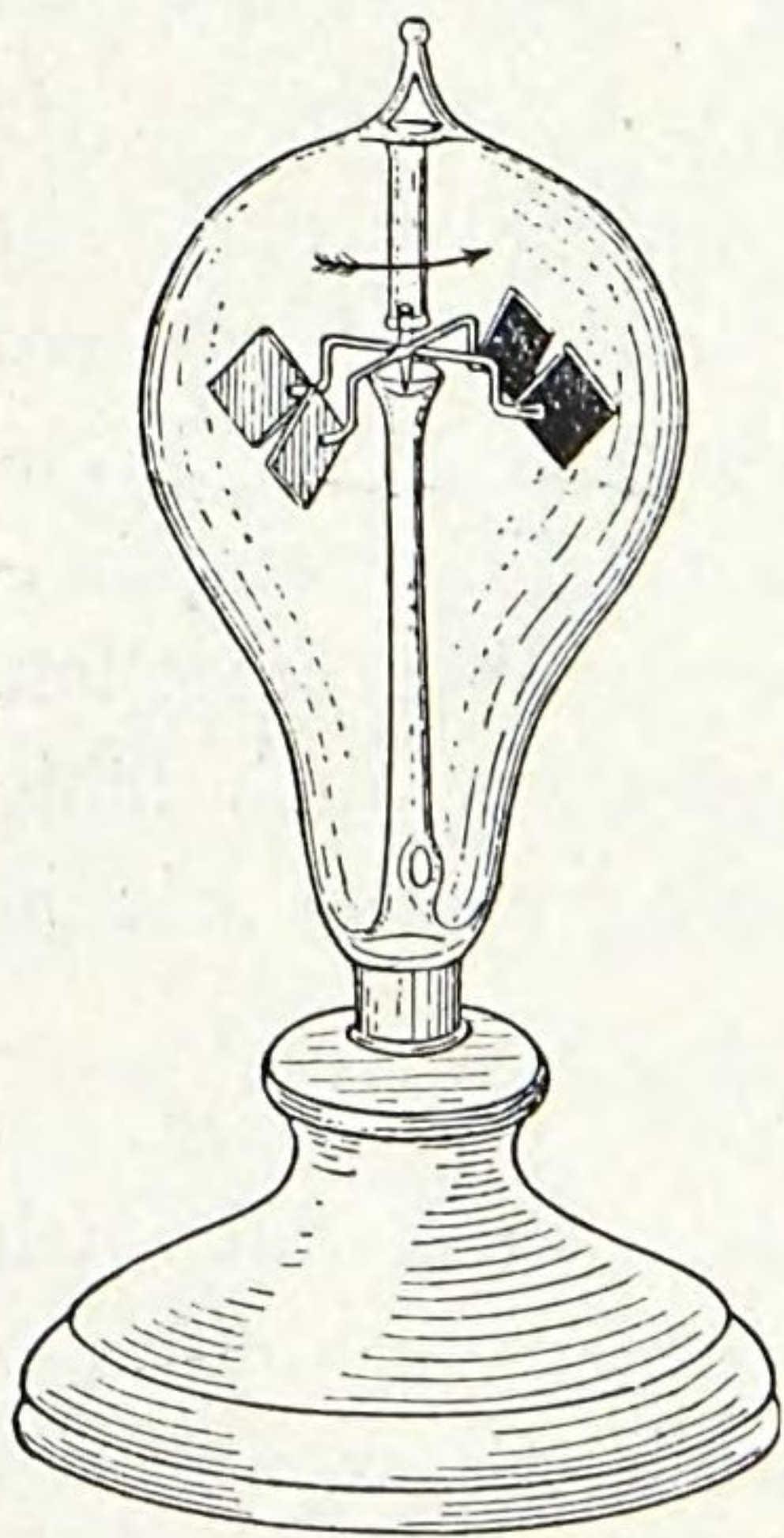


Fig. 98.

Wir hätten bei unseren Versuchen statt der Thermosäule auch ein anderes Instrument, z. B. das Radiometer (Fig. 98), benutzen können. Vor mehr als 20 Jahren machte der berühmte Chemiker Crookes die Entdeckung, dass die einseitig geschwärzten, sehr leicht beweglichen Flügel einer innerhalb einer luftleeren Glashülle befindlichen Windmühle sich drehen, wenn sie vom Licht bestrahlt werden.

Aus der Richtung der Drehung erkennt man, dass es die vom Licht getroffenen geschwärzten Flügelflächen sind, welche vor dem Licht fliehen. Ich will Ihnen jetzt zeigen, dass wir das Radiometer benutzen können, um die Intensität der Strahlung zu messen, welche auf dasselbe fällt. Stellen wir es in den ultravioletten Theil des Spectrums, so drehen sich die Flügel nur langsam; bringen wir es in den ultrarothten Theil, so bewegen sie sich ziemlich schnell. Die Wirkung ist aber nicht nur abhängig von der Art der Wellen, sondern in gewissem Grade auch von der Natur der Oberfläche der Flügel und von der Grösse der Luftverdünnung im Innern der Glashülle. Einige Radiometer sind auch äusserst empfindlich gegen die vom Auge wahrgenommenen sichtbaren Strahlen des Spectrums.

Gleichviel, ob wir das Spectrum mit Hülfe eines Thermometers untersuchen, wie es schon Sir William Herschel gethan hat, oder mittels einer Thermosäule, eines Radiometers oder eines Bolometers, stets finden wir, dass es aus Wellen besteht, welche in verschiedenen Richtungen ausgebreitet worden sind und dass die verschiedenen Wellen eine verschieden grosse heizende Wirkung ausüben. Gleichwohl sind alle diese Wellen mit verschiedener Wärmewirkung zu gleicher Zeit von einer und derselben Quelle ausgesendet worden.

Ein nur ungenügend erhitzter Körper leuchtet nicht, das wissen wir alle. Aber selbst wenn seine Temperatur noch nicht gross genug ist, um sichtbare Wellen auszusenden, schickt er doch ringsherum nach allen Richtungen unsichtbare Strahlen aus. Erwärmen Sie nämlich einen Körper ganz langsam, so strahlt er zunächst nur wenige Wellen von sehr langer Wellenlänge aus. Erhitzen sie ihn mehr und mehr, so sendet er diese langen Wellen immer intensiver aus und zu ihnen gesellen sich mit wachsender Temperatur auch die sichtbaren Strahlen kleinerer Wellenlänge. Erhitzen Sie ihn bis zur Weissgluth, so besteht seine Strahlung nicht nur aus Wärmewellen jeder Grösse, sondern von ihm gehen auch sichtbare Wellen jeder Art aus, von den rothen bis zu den violetten Wellen hin.

Im folgenden Experiment wollen wir eine „dunkle“ Quelle benutzen, d. h. wir wollen die Wellen untersuchen, welche von einem Gefäss warmen Wassers ausgesandt werden. Hier habe ich ein Becherglas, gefüllt mit kochendem Wasser aus dem Siedekessel. Sie wissen, dass Sie dasselbe im Dunkeln nicht sehen, nicht wahr? In einem vollkommen dunkeln Raume strahlt es nicht eine einzige jener Wellen aus, für welche Ihr Auge empfindlich ist. Halten Sie aber Ihre Hand nur wenige Centimeter von dem Gefäss entfernt, so fühlen Sie eine angenehme, von demselben ausgestrahlte Wärme. Sie können nämlich mit den Nerven Ihrer Hand die langen Wärmewellen fühlen, welche in Ihrem Auge keinen Reiz hervorrufen. Diese langen ultrarother Wellen erwärmen alle Körper, auf welche sie fallen, ohne freilich alle die bestrahlten Gegenstände gleich hoch zu erhitzen. Dunkle und schwarze Gegenstände absorbiren die auf sie auffallenden Wellen fast vollständig; weisse und glänzende Objecte dagegen werfen sie wieder zurück, ohne sie zu verschlucken. Was wird nun aus jenen Wellen, welche von den schwarzen Körpern absorbirt werden? Deren Energie geht nicht verloren, sondern wird

in merkbare Wärme umgewandelt. An Stelle der Wellenbewegung des Aethers erhalten wir Molekular-Bewegung der Körpertheilchen. Die glänzende Oberfläche z. B. eines polirten Metalls wird durch die auffallenden Wellen nicht erwärmt, da die Wellen beim Auftreffen nicht vernichtet, sondern von ihr als geordneter Wellenzug gemäss den Gesetzen der Spiegelung zurückgeworfen werden. Immer aber, wenn Wellen von einer Oberfläche zerstört und in Folge dessen absorbirt werden, erhalten wir als Resultat Wärmewirkungen. Die sogenannten Wärmewellen oder ultrarothten Wellen sind an sich nicht heiss. Sie erhitzen nicht das Medium, durch das sie sich als Wellen fortpflanzen. Aber sie werden leicht von den Gegenständen absorbirt, auf welche sie fallen und erst in Folge dieser Absorption erwärmen sie die Körper, von denen sie absorbirt worden sind. Ein „schwarzer“ Körper ist ein solcher, welcher alle auf ihn treffenden

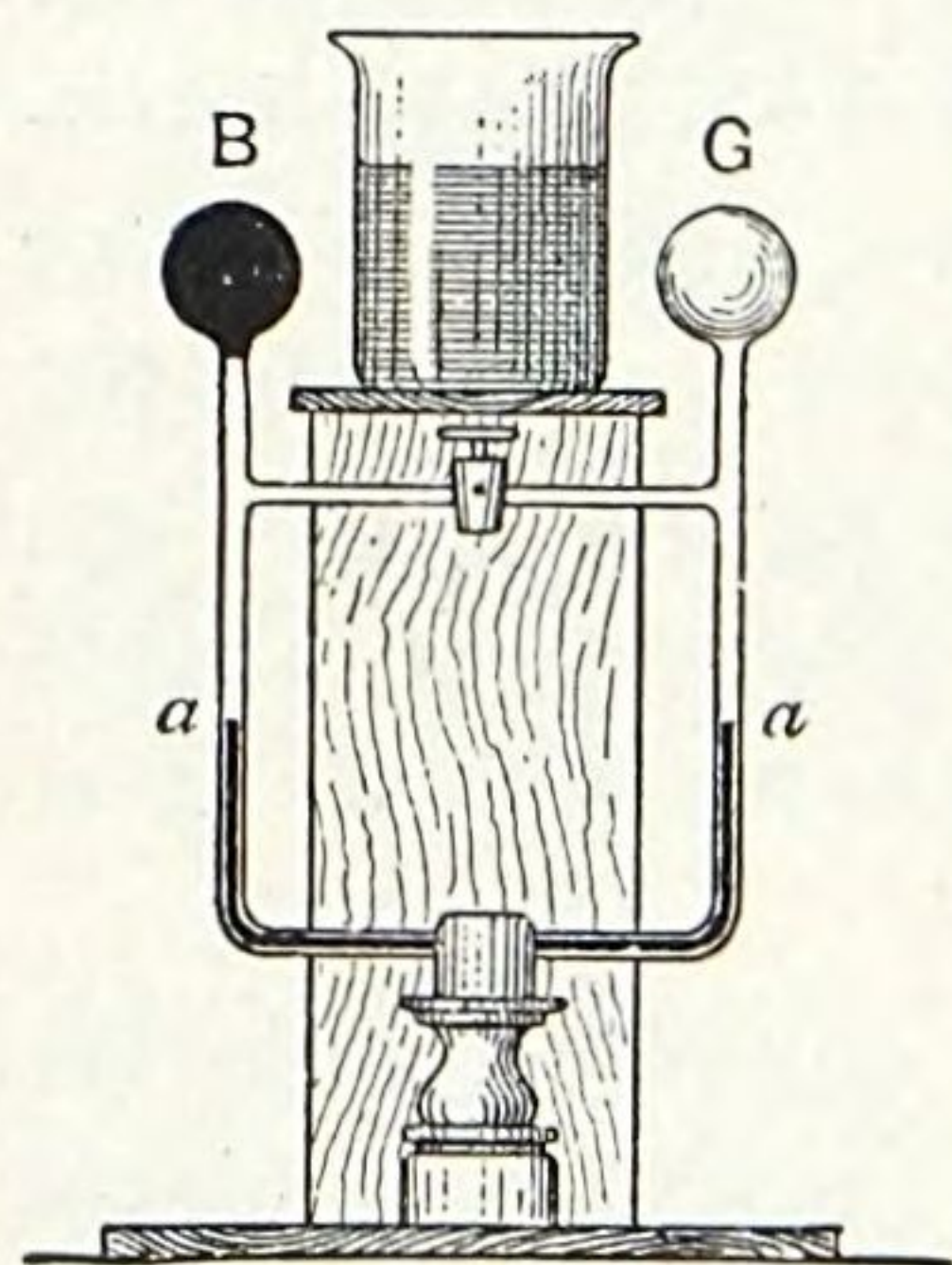


Fig. 99.

Strahlen absorbirt, sowohl die sichtbaren als auch die unsichtbaren. Ein solcher „schwarzer“ Körper erwärmt sich auch mehr als alle anderen Körper, welche einen Theil der Strahlen reflectiren. (Siehe Anmerkung a. folg. Seite.)

Ich habe hier ein eigenthümlich construirtes Thermometer (Fig. 99), welches aus zwei Kugeln besteht, beide gefüllt mit Luft und miteinander verbunden durch eine gebogene Glasröhre, in der sich eine als Index dienende gefärbte Flüssigkeit befindet; die Flüssigkeit reicht bis zur Marke *a*. Lege ich meine Hand auf eine der Kugeln, so wird die Luft im Innern derselben erwärmt, dehnt sich aus, und bringt in Folge der Ausdehnung die Flüssigkeit an dieser Seite zum Sinken. Falls beide Kugeln gleichmässig erwärmt werden, muss die Flüssigkeit nothwendig in ihrer Anfangsstellung verharren. Sie erkennen hieraus, dass dieser Apparat geeignet ist, die Differenz der Temperatur in beiden Kugeln anzuzeigen; man bezeichnet dieses Thermometer darum als „Differentialthermometer“. Bemerken Sie nun ferner, dass die eine der Kugeln *B* mit Lampenruss geschwärzt ist, während man die andere Kugel *G* mit Goldblatt überzogen und so möglichst blank gemacht hat. Ich werde jetzt das mit heissem Wasser gefüllte Becherglas zwischen beide Kugeln stellen, sodass es jede derselben gleichviel bestrahlen kann. Da die vergoldete Kugel wegen ihrer blanken Oberfläche die Strahlen reflectirt, so wird sie

vom heissen Wasser so gut wie nicht erwärmt, während die schwarze Kugel in Folge ihrer absorbirenden Kraft ziemlich stark erwärmt wird. Sie sehen als Folge der ungleichen Erwärmung, dass die Flüssigkeit in der Röhre unterhalb *B* zu fallen beginnt, während sie in der Röhre bei *G* steigt. Hätten wir ein Becherglas strahlen lassen, welches auf der einen Seite geschwärzt, auf der anderen Seite dagegen vergoldet gewesen wäre, so hätten wir als umgekehrtes Experiment zeigen können, dass ein heisser „schwarzer“ Körper die Wärmewellen auch in viel höherem Maasse aussendet, als ein gleich hoch erhitzter blanker. Je mehr ein Körper die auf ihn fallende Strahlung absorbiert, um so mehr Strahlung emittirt er bei gleicher Temperatur.¹⁾

Jetzt wollen wir zu einem anderen Experiment übergehen, bei welchem wir uns wieder der Thermosäule bedienen. Die Thermosäule ist wiederum mit ihren Drähten mit dem Galvanometer verbunden, dessen Spiegel jenen Lichtfleck auf dem Projectionsschirm entwirft. Der Versuch ist so eingerichtet, dass bei Erwärmung der Thermosäule in Folge Bestrahlung ihrer Oberfläche der Lichtfleck nach rechts wandert. Vor der conischen Mündung der Thermosäule ist ein gewöhnlicher Bunsenbrenner aufgestellt (Fig. 100), bei dem sich bekanntlich das Gas vor der Verbrennung mit der atmosphärischen Luft mischt. Er giebt eine nichtleuchtende, rauchlose Flamme von

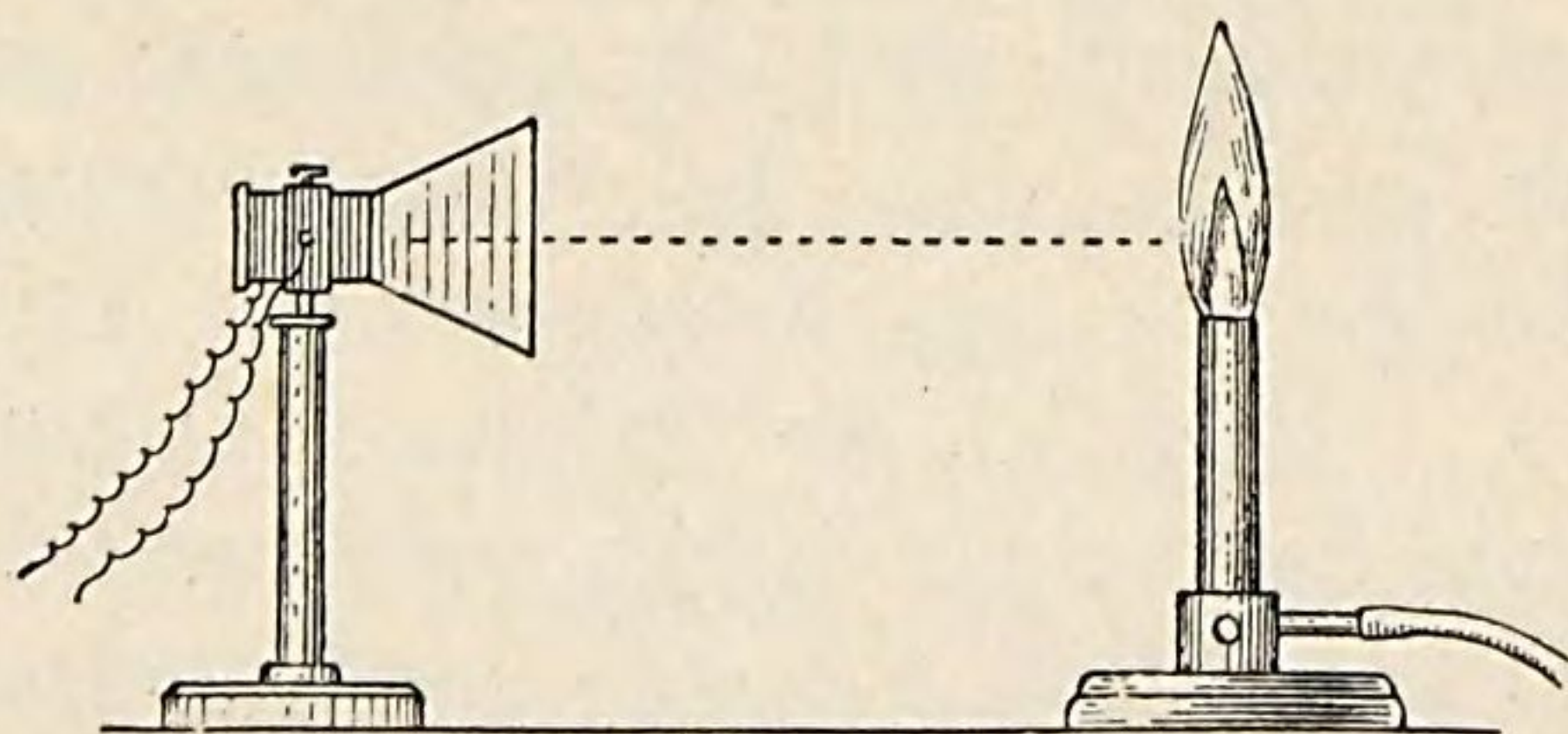


Fig. 100.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Gustav Kirchhoff hat bei der Ableitung seines berühmten Gesetzes von der Absorption und Emission des Lichtes den „absolut schwarzen“ Körper eingeführt, welcher alle Strahlen, von den längsten Wärmewellen bis zu den kleinsten chemisch wirksamen Wellen vollständig absorbiert und dem Kirchhoffschen Gesetze gemäss bei gleicher Temperatur von allen Körpern auch am meisten emittirt. Einen solchen Körper giebt es in der Natur nicht. Wohl aber kann man sich diesen Körper verschaffen, indem man nach Wien und Lummer (Wiedem. Annalen, Bd. 56, 1895, S. 451) einen Hohlraum auf eine gleichmässige Temperatur erhitzt und seine Strahlung durch eine kleine Oeffnung nach aussen gelangen lässt. Wie die vom Uebersetzer mit Herrn Dr. Kurlbaum angestellten Versuche lehren, strahlt ein solcher „absolut schwarzer“ Körper bei etwa 400 Grad Celsius pro Flächeneinheit rund zwölfmal so viel Energie aus als ein blankes Platinblech von gleicher Temperatur.

bläulicher Farbe, die sehr verschieden von der einer gewöhnlichen leuchtenden Gasflamme ist. Obgleich sehr heiss, sendet diese Flamme dennoch sehr wenig sichtbares Licht aus; aber sie strahlt auch, wie sich leicht zeigen lässt, sehr wenig Wärmestrahlen aus. Zwar steigt von ihr eine Säule sehr heisser Luft auf; aber das geht uns hier nichts an. Die Frage, welche uns interessirt, ist, ob der Brenner seitlich Wärmestrahlen aussendet? Ein Experiment soll uns dies lehren. Ich öffne den Metallverschluss, welcher das Mundstück der Thermosäule verschliesst und lasse Licht und Wärme, soweit sie von dem Bunsenbrenner ausgestrahlt werden, durch die Oeffnung auf die Thermosäule fallen. Sogleich bewegt sich der Lichtfleck auf der Wand nach rechts, zeigend, dass mindestens einige Strahlen vorhanden sind, welche die Säule zu erwärmen vermögen. Lege ich für einen Moment zwischen Brenner und Thermosäule eine Glasplatte, so kommt der Lichtfleck fast bis zum Nullpunkt zurück, woraus hervorgeht, dass Glas fast alle Wärmestrahlen absorbiert. Ich entferne die Glasplatte und der Lichtzeiger geht wieder nach rechts, wodurch er anzeigt, dass die Wärmewirkung wieder begonnen hat. Jetzt komme ich zum Kernpunkt des Experimentes.

Halte ich die Oeffnung des Bunsenbrenners zu, sodass die Luft zum Gas keinen Zutritt mehr hat, so brennt die Flamme auf einmal hell leuchtend wie eine gewöhnliche Gasflamme. Dann ist die Verbrennung eine unvollkommenere, die Flamme nimmt einen grösseren Raum ein und die gesammte, in einer gewissen Zeit erzeugte Wärmemenge ist geringer als vorher, wo das Gasluftgemisch vollständig verbrannte. In Folge dieser unvollkommenen Verbrennung bilden sich in der Flamme eine Unmenge fester, unverbrannter Kohlenstofftheilchen, welche, zu hoher Temperatur erhitzt, Licht aussenden. Diese festen, hoch erhitzten Theilchen strahlen aber alle Wellen in viel stärkerem Grade aus als die Gastheilchen der schwach bläulich leuchtenden Bunsenflamme, und zwar strahlen sie nicht nur die Lichtwellen, sondern auch die langen Wärmewellen viel intensiver aus. Sobald ich mit meinen Fingern und Daumen die Löcher des Bunsenbrenners wieder zuhalte, in demselben Moment schnellt der Lichtfleck auf der Wand wieder nach rechts und geht über die Scala hinaus, ein Beweis, dass die helle Flamme viel mehr Wärmestrahlen aussendet als die nicht leuchtende Bunsenflamme. Ich nehme meine Finger fort, die Luft mischt sich wieder mit dem Gas, die Flamme nimmt wieder ihr früheres bleiches Aussehen an und der Lichtfleck wandert zurück zu seiner ursprünglichen Lage. So

oft ich die Flamme hell brennen lasse, erhalte ich in seitlicher Richtung mehr Wärmestrahlung.¹⁾

Um dieses zu zeigen, kann ich auch ein Radiometer anstatt der Thermosäule benutzen. Die Flügel der Mühle drehen sich schnell, wenn die Flamme leuchtet, dagegen langsamer, wenn man durch Hinzulassen der Luft die Verbrennung beschleunigt, sodass alle festen Kohlenstoffpartikelchen zu Kohlensäure verbrennen.

Das folgende Experiment, welches ich Ihnen zeigen will, unterscheidet sich vom vorhergehenden nur dadurch, dass ich an Stelle einer Flamme ein Stück Eis auf die Thermosäule strahlen lasse. Jetzt zieht sich der Zeiger auf der Wand zurück und wandert vom Nullpunkt nach links, woraus wir schliessen, dass die Thermosäule abgekühlt worden ist. Vielleicht halten Sie dies für einen Beweis dafür, dass das Eis „kalte“ Strahlen aussendet. Wohl mag es so scheinen. In Wirklichkeit verhält es sich jedoch folgendermaassen: „Kalt“ ist ein relativer Begriff und bedeutet weiter nichts als „weniger heiss“. Alle Dinge, welche sich nicht in jenem unerreichbaren Zustand des „absoluten“ Nullpunktes (— 273 Grad Celsius) der Temperatur befinden, sind mehr oder weniger heiss; die sogenannten „heissen“ Gegenstände mehr, die „kalten“ Objecte weniger. Jeder Körper aber strebt dahin, seine Wärme abzugeben, der „heisse“ mehr als der „kalte“. Eis ist weniger heiss als alle anderen in diesem Zimmer befindlichen Dinge. Eis ist also kälter als die Thermosäule. Letztere sendet Wärme aus, von welcher ein Theil zum Eisstückchen geht. Aber auch das Eis strahlt Wärmewellen aus, obgleich in geringerem Grade wie die wärmeren Objecte dieses Zimmers. Wir haben demnach zwei sich bestrahlende Körper, die Thermosäule, von höherer und das Eis von niedrigerer Temperatur. In Folge dieser ungleichmässigen Bestrahlung giebt die Thermosäule mehr Wärme ab als das Eis und kühlt sich demnach ab. Freilich ist

1) Anmerkung des Uebersetzers: Es steht dies im Einklang mit dem Kirchhoffschen Gesetz, welches aussagt, dass den Substanzen mit geringem Absorptionsvermögen auch ein geringes Emissionsvermögen zukommt. Die jede Flamme umspülende heisse Luft sendet keine Lichtwellen aus, da sie dieselben ungehindert hindurchlässt. Ebenso strahlen in einem Platintiegel hoch erhitzte, durchsichtige Substanzen, wie Glas, Salpeter u. s. w. kaum merklich Licht aus, da man durch sie hindurch den glühenden Tiegel deutlich leuchten sieht. Nur in Bezug auf die ganz langen Wärmewellen verhalten sich auch diese Substanzen und die Gase ähnlich dem schwarzen Körper. In der nichtleuchtenden Bunsenflamme sind es die Verbrennungsproducte des Kohlenwasserstoffs, Kohlensäure und der Wasserdampf, welche emittiren, da sie einige lange Wellen zu absorbiren vermögen.

die Wirkung dieselbe, als ob wirklich „Kälte“ vom Eis ausgestrahlt worden wäre.

Lassen Sie uns jetzt zu einem Experiment übergehen, welches, wie ich glaube, seinen Ursprung vor nahe einem Jahrhundert hier in der Royal Institution nahm. Von jeher war die Wärme-Emission und die Eigenschaft der Wärmewellen Lieblingsstudium in der Royal Institution gewesen. Der Gründer dieses Instituts, Graf Rumford, erfand selbst viele Experimente über Wärmestrahlen und ihm verdanken wir die Kenntniss der Thatsache, dass Wärme auch durch den luftleeren Raum gestrahlt wird. Sir Humphry Davy zeigte

als Professor hier ein sehr schönes Experiment, bei welchem Wärmestrahlen von einem Punkte des Raumes mit Hülfe zweier Parabolspiegel aus versilbertem Metall nach einem andern Punkte des Raumes reflectirt werden. Ich erlaube mir dieses Experiment zu wiederholen und verwende dazu die zwei Spiegel, welcher sich schon Sir Humphry bedient haben soll und welche seitdem oft von Professor Tyndall benutzt wurden.

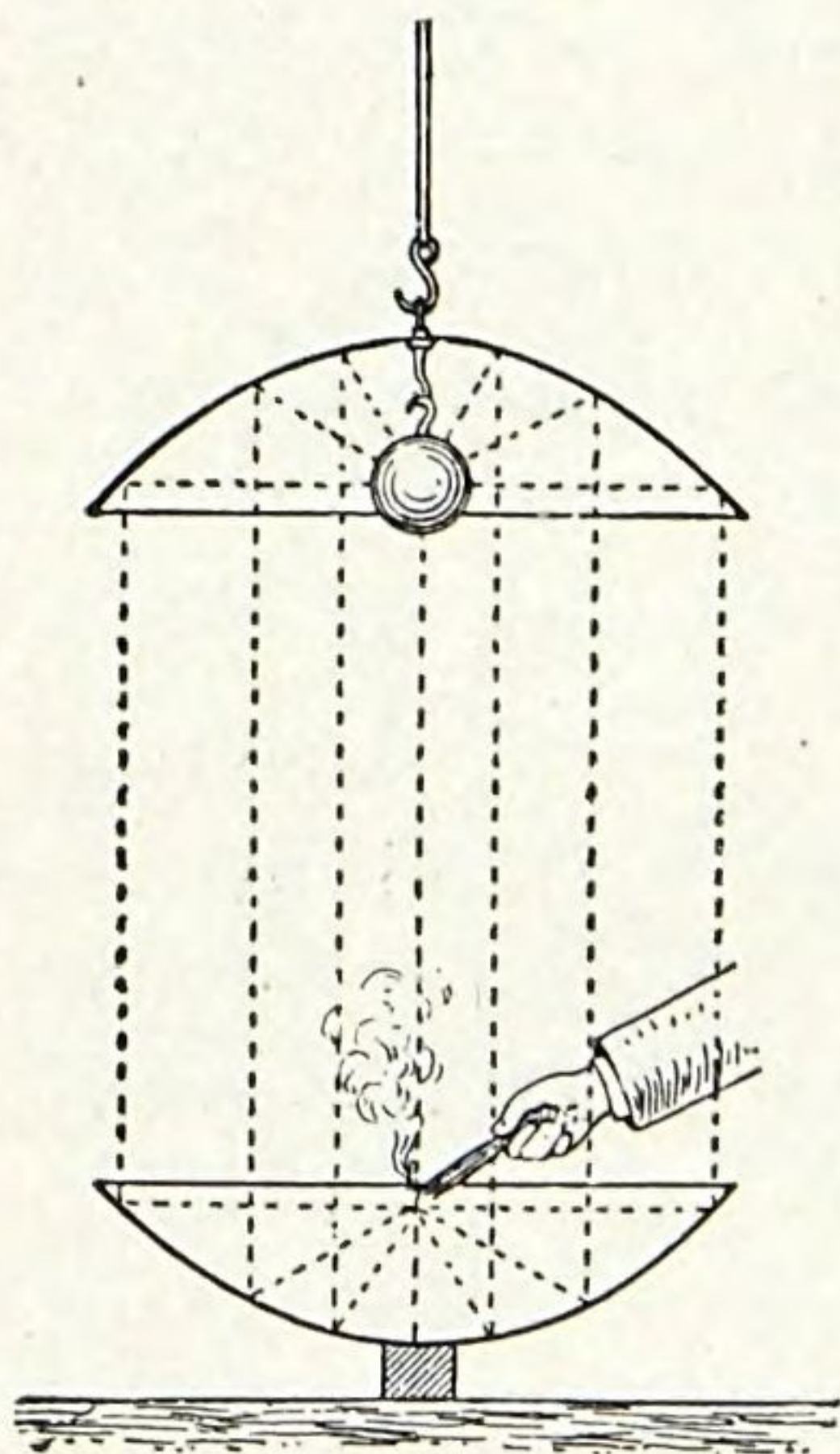


Fig. 101.

Der eine der beiden gekrümmten Spiegel ist mit seiner Mündung nach unten in einer Höhe von etwa 3 Meter über dem Experimentirtische aufgehängt. Der andere steht auf dem Tische mit seiner Mündung nach oben gerichtet gerade unter dem ersteren. Ich lasse

den oberen für einen Moment herab. Nachdem eine rothglühende Kugel mittels eines Hakens im Brennpunkt desselben aufgehängt worden ist, wird der Spiegel wieder in seine frühere Lage über dem Tisch gebracht. Da sich die Kugel gerade in seinem Brennpunkt befindet, sammelt der Spiegel alle von ihr ausgehenden Strahlen und reflectirt sie in Gestalt eines cylindrischen Strahlenbüschels senkrecht nach unten. Es ist ein Büschel von unsichtbaren ultrarother Wärmestrahlen, gemischt mit nur wenigen sichtbaren rothen Strahlen. Dieses Büschel fällt auf den zweiten Spiegel (Fig. 101), welcher dasselbe wieder vereinigt und in seinem Brennpunkt bei F sammelt. Ich halte meine Finger an die Stelle, wo die Strahlen sich alle treffen; ich kann es vor Hitze nicht aushalten. Ich bringe an diese Stelle ein Stück schwarzes Papier und sogleich fängt es an zu rauchen und geht in sichtbare Verbrennung über. Hier ist eine Cigarre. Halte ich sie

in den Brennpunkt, so absorbirt sie Wärmewellen genug, um sich zu erhitzen; der aufsteigende Rauch beweist, dass sich die Cigarre durch die auf ihr concentrirten Wärmestrahlen entzündet hat.

Unser Experiment lehrt also, dass Wärmestrahlen ähnlich den Lichtstrahlen reflectirt werden können. Unsere vorhergehenden Experimente mit dem Steinsalzprisma zeigten, dass die Wärmestrahlen auch dem Gesetz der Brechung folgen. Wir wollen die Thatsache der Reflexion noch durch einen anderen Versuch erläutern.

Die bis zur Rothgluth erhitzte Kugel, welche in Folge ihrer Ausstrahlung fast zur unsichtbaren Gluth übergegangen ist, wird jetzt in einem Stativ auf dem Tische befestigt. Wir nehmen die Thermosäule, welche uns bisher schon so gute Dienste erwiesen hat und sehen zu, was sie uns über den rothglühenden Ball aussagen kann. Die Entfernung zwischen beiden beträgt etwa 2 bis 3 Meter. Ich brauche nur die Mündung der Thermosäule gegen die Kugel zu richten, und sogleich sagt uns der Lichtfleck auf dem Schirm an, dass die Thermosäule von der Kugel Strahlung empfangen hat. Wellen, welche wir nicht sehen können, werden von der Thermosäule angezeigt, wenn wir letztere so richten, dass sie in gerader Richtung auf die Wärmequelle blickt. Sie wirkt also gleich einem künstlichen Auge, welches zwar nicht die sichtbaren Strahlen, wohl aber die langen Wärmewellen zu empfinden im Stande ist. Drehe ich die Mündung der Säule auf die Seite, sodass die Wärmestrahlen die Oberfläche der Thermosäule nicht erreichen, so geht der Lichtfleck auf der Wand bis zu seinem Nullpunkt zurück. Benutze ich jetzt ein einfaches Stück Weissblech als Spiegel und reflectire die vom heissen Eisenball kommenden Wärmewellen zurück in die Oeffnung der Thermosäule, so sehen Sie, dass, sobald der Spiegel den richtigen Winkel einnimmt, der Lichtfleck sich nach rechts bewegt: hieraus folgt, dass wir einige der Wärmewellen am Weissblech zur Thermosäule reflectirt haben.

Da wir gerade eine heisse Kugel haben — besser wäre es, wir hätten eine hellroth glühende — so kann ich Ihnen noch einige interessante Experimente zeigen, welche auf der Anwendung gewisser wärmeanzeigender Farben beruhen.¹⁾ Hier ist ein „Wärmeindicator“,

1) Diese wärmeanzeigenden Farben sind Quecksilberjodid und ähnliche Verbindungen anderer Metalle. Sie wurden vor fast 30 Jahren von Dr. Meusel entdeckt. Die Scharlachfarbe, welche bei etwa 87° schwarz wird ist ein Doppeljodid von Quecksilber und Kupfer. Die gelbe Farbe, welche bei etwa 45° roth wird, ist Quecksilber- und Silberjodid. Um erstere herzustellen, fügt man eine Lösung von Jodkalium zu einer Lösung von Kupfersulfat, bis der entstehende Nieder-

ein mit Scharlachfarbe bestrichenen Papier, welches bei Erwärmung schwarz wird. Hier ist ein anderer Wärmeindicator von blassgelber Farbe, welcher selbst bei nur geringer Erwärmung eine rothe Färbung annimmt. Die Vorderfläche ist überall mit diesem gelben Farbenindicator bemalt; die Hinterseite ist mittels Lampenruss geschwärzt, damit sie die Wärmestrahlen besser absorbirt. Ich halte den Schirm in eine geringe Entfernung von der heissen Kugel — ein gewöhnliches Kohlenfeuer wirkte ungleich besser — und bringe meine Hand zwischen Kugel und Schirm und zwar nahe dessen Rückwand. In wenigen Secunden färbt sich der Schirm auf seiner ganzen Oberfläche roth mit Ausnahme der Stellen, an denen er durch meine Hand geschützt war, deren Schatten — eine Art Wärmeschatten — auf dem Schirm also zeitweilig photographirt oder besser thermographirt worden ist. Sobald der Schirm sich abkühlt, nimmt er seine frühere gelbe Färbung wieder an.

Hier ist ein anderer Schirm, welcher von Papier gefertigt ist, das mit scharlachrother wärmeanzeigender Farbe bestrichen ist. Die Rückseite ist vollkommen vergoldet und auf diese vergoldete Fläche ein grosser schwarzer Buchstabe *S* gelegt worden. Ich halte den Schirm mit seiner vergoldeten Fläche in die Nähe der heissen Kugel, so dass die vergoldete Oberfläche alle Wärmestrahlen zurückspiegelt. Sie vermuthen vielleicht, dass derjenige Theil, welcher über dem Golde noch den schwarzen Buchstaben hat, doppelt gegen die Wärmestrahlen geschützt sei; aber Sie täuschen sich. Gerade dieser Theil absorbirt die Wärmestrahlen, verwandelt sie in Wärme und diese durch die Goldschicht geleitete Wärme ist es, welche die Purpur-

schlag wiederum gelöst ist; sodann fügt man eine concentrirte Lösung von Quecksilberchlorid hinzu, wodurch das rothe Doppeljodid entsteht.

Um die empfindliche gelbe Farbe zu erhalten, setzt man zu einer Lösung von Silbernitrat eine Lösung von Jodkalium, bis der Niederschlag (Silberjodid) wieder gelöst ist. Zu dieser Lösung setzt man eine concentrirte Lösung von Quecksilberchlorid, bis ein hellgelber Niederschlag sich bildet. Die Niederschläge sammelt man auf dem Filtrirpapier und wäscht sie in kaltem Wasser. Um sie als Farbe zu gebrauchen, versetzt man sie mit Gummi arabicum.

Mit diesen Farben kann man viele interessante Experimente anstellen, sei es über die Wärmestrahlung, Wärmeleitung oder Convection der Wärme. Ein sehr einfaches Experiment ist der Erwähnung werth. Es lehrt, dass warmes Wasser auf kaltem schwimmt. Dazu wird ein Streifen des mit gelber Farbe bestrichenen Papiers vertikal an die Aussenseite eines Becherglases geklebt. Dasselbe wird halb mit kaltem Wasser gefüllt. Eine schwimmende Holzscheibe wird eingeführt um eine Mischung zu verhindern, und nun füllt man das Becherglas vorsichtig mit heissem Wasser. Dann färbt sich nur die obere Hälfte des Papiers roth.

farbe auf der anderen Seite des Schirmes in Schwarz verwandelt. Der auf der Rückseite befindliche Buchstabe kommt somit auf der Vorderseite schwarz zum Vorschein.

Schliesslich gebe ich noch eine Variation einer Tyndallschen Beobachtung, welche Sie in seinem Buche¹⁾ über die Wärme erwähnt finden. Bei Gelegenheit eines Brandes verkohlte die von einem brennenden Hause ausgestrahlte Hitze die Fensterrahmen der gegenüberliegenden Häuser, blätterte die Farbe auf den Fensterahmen ab und setzte sie in Brand. Da wo die Hausnummer in goldenen Lettern auf dem Hause angebracht war, wurden aber die Wärmewellen zurückgeworfen und somit Farbe und Holz vor dem Verkohlen geschützt. Zur Illustration dieses Vorgangs wähle ich ein geschwärztes Blatt Papier, auf welches ein Dreieck aus Goldblatt geklebt worden ist und dessen andere Seite mit der scharlachrothen, wärmeempfindlichen Farbe bestrichen ist. Setze ich es der Bestrahlung seitens der heissen Kugel aus, so sehen Sie, wie der dreieckige, vom Goldblatt bedeckte Theil der Fläche kalt bleibt, während der übrige Theil Wärme absorbirt und das Papier schwärzt.

Sie werden wohl ohne Weiteres zugeben, dass wir nun genug Beweise dafür besitzen, dass diese unsichtbaren Wärmestrahlen in Wirklichkeit nichts anderes sind als unsichtbares Licht: dass der Unterschied zwischen beiden nicht in der Art, sondern lediglich in der verschiedenen Grösse der Wellen begründet ist. Betrachten wir noch einmal den Process der Verbrennung, bei dem alle Wellen ausgesandt werden. Erwärmen Sie einen Körper ganz langsam von einer niedrigen Temperatur zu immer höheren Temperaturen. Im Anfang schwingen seine Theilchen nur mässig und die von ihnen in den umgebenden Aether gesandten Wellen haben eine relativ grosse Wellenlänge. Je mehr Sie den Körper erhitzen, um so lebhafter schwingen seine Theilchen und zu den langen ausgesandten Wellen gesellen sich solche von immer kleinerer Wellenlänge und höherer Schwingungszahl. Dabei steigt, wie schon erwähnt, die Intensität der zuerst vorhandenen langen Wellen schnell in die Höhe und die ausgestrahlte Wärmemenge wird immer grösser.

Hier habe ich einen dünnen Platindraht zwischen zwei Klemmen ausgespannt. Leite ich durch den Draht einen elektrischen Strom,

1) Die Wärme, eine Art von Bewegung. Deutsche autorisirte Uebersetzung von Anna von Helmholtz und Cl. Wiedemann. Verlag von Fr. Vieweg & Sohn, Braunschweig.

so kann ich ihn so viel oder so wenig erhitzen als ich will. Er ist jetzt nur mässig erwärmt und sendet bloss einige lange Wellen von schwacher Intensität aus. Verstärke ich den elektrischen Strom, so steigt seine Temperatur und strahlt nun nicht nur viel mehr Wärme sondern auch sichtbare rothe Strahlen aus: er leuchtet! Jeder feste Körper zeigt beim Erhitzen als erste sichtbare Gluth eine rothe Farbe; niemals ist der erste farbige Schimmer blau oder gelb.¹⁾ Wächst

1) Anmerkung des Uebersetzers: Der von Draper im Jahre 1847 aufgestellte Satz, dass alle festen Körper bei etwa 500 ° C. mit rother Farbe (Rothgluth) zu leuchten anfangen, ist nach den neuesten Forschungen nur bedingt richtig. Als H. F. Weber (Sitzgsber. d. Berl. Acad. 28, S. 491, 1887) im Dunkelmzimmer bei Nacht die Strahlung von Glühlampen studirte, fand er, dass die Lichtentwicklung gar nicht mit der Rothgluth beginnt, sondern dass der Kohlefaden schon bei 400 Grad C. ein „düsternebelgraues“ oder „gespenstergraues“ Licht aussendet. Diese erste Spur der „Graugluth“ erscheint dem Auge unstat, glimmend, auf- und abhuschend und erst, wenn die Rothgluth (bei 500 ° C.) eintritt, macht das von dem Faden ausgesandte Licht den Eindruck eines absolut ruhigen Lichtes.

Erst neuerdings gelang es, die „Graugluth“ des gespensterhaften Gewandes zu berauben. Auf Grund der neueren Sehtheorien von A. König und J. v. Kries wies der Uebersetzer nach (Wied. Ann. d. Physik u. Chemie Bd. 62, S. 14—29, 1897), dass die Grau- und Rothgluth sowie die ganze Art ihres Auftretens nur dann eine befriedigende und vollständige Erklärung findet, wenn man die Graugluth als die von den Stäbchen der Netzhaut, die Rothgluth als die von den Netzhautzapfen vermittelte Lichtempfindung auffasst.

J. v. Kries hatte 1894 die Hypothese aufgestellt, dass die Zapfen das farbige Sehen bei grosser Helligkeit, die Stäbchen dagegen, ganz wie in Königs Theorie, das farblose Sehen bei geringer Helligkeit vermitteln. Dementsprechend bezeichnet Kries die Zapfen als unseren farbentüchtigen „Hellapparat“, die Stäbchen als den totalfarbenblinden „Dunkelapparat“. Dabei hat der Stäbchenapparat die besondere Fähigkeit, seine hohe Empfindlichkeit gegen schwaches Licht durch den Aufenthalt im Dunkeln wesentlich zu steigern.

Nun besitzen wir auf der Netzhaut eine mittlere Stelle, die Netzhautgrube oder fovea centralis genannt, wo nur Zapfen und gar keine Stäbchen vorhanden sind, während auf der übrigen Netzhaut beide Elemente vorkommen, so zwar, dass nach dem Rande zu die Stäbchen an Zahl die Zapfen überwiegen. Ferner ist die Netzhautgrube die bevorzugte Stelle, mit der wir sehen, wenn wir einen Gegenstand fixiren und scharf ins Auge fassen. Beim Fixiren oder beim direkten Sehen (foveal) sind daher die Stäbchen ausgeschaltet und nur beim indirekten Sehen (peripher) treten ausser den Zapfen auch noch die Stäbchen in Thätigkeit. Hier treten also bei geringer Helligkeit die beiden Sehapparate in einen scharfen Wettstreit ein, der, wenn nur die Helligkeit gering genug ist, zu Gunsten der farbenblinden Stäbchen ausfällt, sodass dann alles „Grau in Grau“ d. h. in farbloser Helligkeit erscheint.

Lange ehe die Physiologen zu dieser Anschauung gelangt sind, hat die vergleichende Anatomie zu der Erkenntniss geführt, dass den Stäbchen der Netzhaut

die Temperatur über die erste Rothgluth hinaus, so sendet der Draht ausser dem rothen Licht auch noch gelbe Strahlen aus und nimmt daher eine hellrothe Färbung an. Beim weiteren Erhitzen gesellen sich zu den rothen und gelben Strahlen auch noch die grünen, blauen u. s. w. Sobald der Draht diejenige Temperatur erreicht hat, bei der er alle sichtbaren Strahlen aussendet, nennen wir ihn „weissglühend“.

die Rolle des „Sehens im Dunkeln“ zufällt. Die Zoologen (Max Schultze) wussten schon 1866, dass die Thiere, welche wie die Eule bei Nacht auf Raub ausgehen, oder wie der Maulwurf verdammt sind ihr Dasein unter der Erde zu verbringen, auch an der Netzhautgrube Stäbchen besitzen, wo wir nur Zapfen haben, und dass es sogar Nachtthiere giebt, bei denen auf der ganzen Netzhaut nur Stäbchen und überhaupt keine Zapfen vorhanden sind. „Stäbchenseher“ wurden sie darum geheissen. Und so sind auch wir im Dunkeln „Stäbchenseher“ und farbenblind, so lange die vorhandenen Lichtwellen noch nicht im Stande sind, die Zapfen zu reizen.

Es lag also nahe, die Graugluth den Stäbchen und die Rothgluth den Zapfen zuzuschreiben und sich zu fragen, ob hierdurch die von Weber beobachtete gespensterhafte „Graugluth“ ihre Erklärung findet. Zunächst lässt sich jenes von Weber beobachtete Hin- und Herzittern der Graugluth leicht erklären. Da bei ihrer grossen Empfindlichkeit im Dunkeln die ausgeruhten Stäbchen früher erregt werden als die Zapfen, so erscheint der erhitzte Körper zunächst in farbloser Gluth (Graugluth), welche mit steigender Temperatur lediglich an Helligkeit zunimmt. Diese „Graugluth“ kann aber nur peripher wahrgenommen werden d. h. von den Stellen der Netzhaut, an denen Stäbchen vorhanden sind; solange die Zapfen noch nicht in merkbare Erregung gerathen, geht also lediglich von den peripheren Stellen des indirecten Sehens eine Lichtmeldung zum Gehirn. Es tritt somit der uns ungewohnte Zustand ein, dass wir nur das sehen, was wir nicht fixiren und dass die Lichtempfindung aufhört und das Gesehene verschwindet, sobald wir den Blick dorthin richten, von wo die erregenden Strahlen zu kommen scheinen. So erscheint uns der Glühfaden im nächtlichen Dunkel anfangs als ein „Gespenst“; es flieht unserem Blick und huscht vor dem irrenden Auge hin und her.

Dieser merkwürdige Zustand hört auf, wenn die Glühtemperatur so hoch geworden, dass auch die Zapfen der Netzhautgrube eine genügend intensive Lichtempfindung im Gehirn vermitteln. Jetzt sehen wir auch das leuchten, was wir fixiren und anblicken, ganz wie wir es unter den gewöhnlichen Umständen gewöhnt sind, und das unstete Leuchten der Graugluth verwandelt sich in ruhig zu beobachtende „farbige“ Gluth. Zunächst wird bei dem Wettstreit beider Sehapparate, ihre gesonderten Meldungen im Gehirn zur Geltung zu bringen, die Zapfen die farbige und die Stäbchen die farblose, eine Verschmelzung beider Empfindungen zu Stande kommen. Mit dem Ueberwiegen der Zapfen über die Stäbchen bei wachsender Temperatur des Kohlefadens wird die farbige Gluth überwiegen und demgemäss immer gesättigter erscheinen. Feuerroth erscheint nach den Versuchen des Uebersetzers ein Körper erst bei 600° Celsius, und zwar nur bei directem Sehen; bei indirectem Sehen nimmt auch er eine gespenstergraue Färbung an.

Nie kann ein fester Körper „blau glühend“ werden, weil in allen Fällen die Strahlung am unteren Ende des Spectrums (Roth) beginnt; zu der rothen Farbe aber gesellen sich bei steigender Temperatur die anderen Farben, bis die Weissgluth erreicht ist. Ferner kann die weisse Farbe erst eintreten, wenn ausser den rothen, gelben, grünen u. s. w. Strahlen ein gewisser Theil auch der kleinsten violetten Wellen zur Ausstrahlung gelangt. So erscheint also der Weg zur Erzeugung sichtbarer Wellen nur als eine Fortsetzung desjenigen Processes, der die Ursache für die Entstehung der unsichtbaren, ultrarothten Wellen ist. Bedarf es noch eines weiteren Beweises für die Behauptung, dass die sichtbaren und unsichtbaren Wellen wesentlich gleicher Natur sind? Ich habe Ihnen gezeigt, dass sich diese ultrarothten Wellen in vieler Beziehung wie sichtbare Wellen verhalten. Sie haben selbst gesehen, dass sie von einer Linse gebrochen, durch ein Prisma zerstreut, an einem Spiegel reflectirt und von einer geschwärzten Oberfläche absorbirt werden. Aber sie pflanzen sich durch den Raum auch mit derselben Geschwindigkeit wie die sichtbaren Strahlen fort. Diese Thatsache folgern wir aus der bei einer totalen Sonnenfinsterniss auftretenden Erscheinung. In demselben Augenblick, in welchem die letzten Sonnenstrahlen durch den Mond unserem Auge entzogen werden, ist auch die Sonnenwärme von uns abgeschnitten. Sobald aber das Licht wieder auftaucht, sind auch die Wärmestrahlen wieder da. Diese eine Thatsache beweist, dass die Wärmestrahlen lediglich eine Art unsichtbaren Lichtes ist. Zum Ueberfluss will ich Ihnen aber noch einen anderen Beweis erbringen. Sie sollen sehen, dass die Wärmewellen auch polarisirt werden können.

Ich habe hier, wie in meiner dritten Vorlesung (Fig. 82, S. 85) ein Paar Nicolscher Prismen, von denen das eine als Polarisator, das andere als Analysator dient. Die Lampe sendet ihr Strahlenbüschel durch beide hindurch. Fangen wir dieses durchgegangene Licht auf einem Schirm auf, so können wir beobachten, dass alles Licht hindurchgeht, falls die Hauptebenen beider Prismen einander parallel stehen, während alles Licht abgeschnitten wird, falls ihre Hauptschnitte einen rechten Winkel miteinander bilden. Es ist dieses Experiment ein rein optisches. Jetzt nehme ich meine Thermosäule, die wir als ein „künstliches Auge“ schätzen gelernt haben, welches gegen die unsichtbaren Wärmestrahlen empfindlich ist und bringe sie dorthin, wo der Papierschirm gestanden hat. Da der Polarisator und Analysator eine gekreuzte Stellung einnehmen, so tritt das

„dunkle Feld“ (S. 76) hervor, und es fallen auf die Thermosäule weder Licht- noch Wärmestrahlen; wie Sie sehen, steht der Lichtfleck des Galvanometers, dessen Lage den Zustand der Thermosäule anzeigt, thatsächlich auf dem Nullpunkt der Scala. Drehe ich jetzt den Analysator um 90 Grad und stelle das „helle Feld“ wieder her, so wandert der Lichtfleck auf der Scala sofort nach rechts und meldet, dass die polarisirte Wärme sowohl wie das polarisirte Licht durch den Analysator gegangen ist und die Säule getroffen hat. Beim Zurückdrehen des Analysators werden wieder die sichtbaren sowohl, als auch die unsichtbaren Strahlen abgeschnitten und der Lichtfleck wandert zum Nullpunkt zurück.

Nun lassen Sie mich den Beweis vervollständigen, indem ich die sichtbaren Strahlen ausschliesse und nur mit den unsichtbaren Strahlen operire. Dazu schalte ich eine Platte aus undurchsichtigem Ebonit ein, welche keine Spur sichtbaren Lichtes zu durchdringen vermag. Trotzdem ich die unsichtbaren Strahlen auf solche Weise filtrirt und alle sichtbaren Strahlen ausgemerzt habe, gelangen, wie Sie sehen, dennoch einige Wellen durch den Polarisator, welche die Thermosäule zu erwärmen vermögen; beim Drehen des Analysators um 90 Grad werden aber auch diese ausgelöscht.

Ebonit ist also insofern eine sehr interessante Substanz, als sie als Wellenfilter dienen kann, um die langen Wärmewellen von den kürzeren sichtbaren zu trennen. Wellenfilter oder Strahlenfilter wurden von Professor Tyndall vielfach bei seinen Vorlesungen über strahlende Wärme gebraucht; ich glaube aber nicht, dass er schon mit der genannten Eigenschaft des Ebonits bekannt war. Es werde das Experiment wiederholt unter Benutzung eines Crookesschen Radiometers (Fig. 98, S. 131). Ich setze es vor die Laterne, blende aber zuvor durch ein dickes Metallblech alle Strahlung ab, sodass das Radiometer ohne Bewegung ist. Die vorhandene ganz langsame Drehung rührt vom diffusen Licht im Zimmer her. Ersetze ich das Metall durch eine Ebonitplatte, welche für gewöhnliches Licht ebenso undurchsichtig ist wie das Metall, so sehen Sie, dass trotzdem die Flügel sich zu drehen anfangen.

Tyndall verwandte als Strahlenfilter für lange Wärmewellen einen Glastrog, gefüllt mit einer dunklen Lösung von Jod in Schwefelkohlenstoff. Hier habe ich eine dieser Zellen, welche dadurch kalt gehalten wird, dass sie von einem zweiten Gefäss umgeben ist, durch welches kaltes Wasser fliesst. Hinter der Wand des Saales steht eine mächtige Bogenlampe, deren Strahlen durch eine Oeffnung der

Wand eintreten können. Wir wollen dieses Strahlenbüschel durch eine Steinsalzlinse concentriren und es nach seinem Durchgang durch die Tyndallsche Zelle, welche die sichtbaren Strahlen verschluckt, die Wärmewellen aber ungehindert passiren lässt, in einem Punkte vereinigen. Zuerst stellen wir das Experiment ohne Zelle an, sodass sich alle sichtbaren und unsichtbaren Strahlen im Brennpunkt vereinigen. Bringe ich an den Ort des Brennpunktes ein Stück schwarzes Papier, so fängt es an zu rauchen und entzündet sich schliesslich. Jetzt schalten wir die Zelle in den Strahlengang ein, sodass das sichtbare Licht abgeschnitten wird. Trotzdem beginnt, wie Sie sehen, das in den unsichtbaren Brennpunkt der Wärmestrahlen gehaltene schwarze Papierstück wieder zu rauchen, um schliesslich mit sichtbarer Gluth zu verbrennen.

Ich gehe jetzt zu der wichtigsten der neueren Entdeckungen über, welche aus dem Jahre 1888 datirt. Durch sie haben wir noch längere Wellen als die bisher betrachteten kennen gelernt, die sich ganz ähnlich den Wärme- und Lichtwellen verhalten und wie diese reflectirt, gebrochen, polarisirt und gebeugt werden können. Dennoch unterscheiden sich diese Wellen in der auffallendsten Weise von den bisher erörterten Wellensorten: Es kommt ihnen nämlich eine Wellenlänge zu, welche nicht nach Millionteln eines Millimeters gemessen zu werden braucht; vielmehr können diese Wellen eine Länge von mehreren Millimetern, von Centimetern, ja von vielen Metern annehmen. Sie werden schon errathen haben, dass ich die „elektrischen Wellen“ meine, welche von Clerk Maxwell im Jahre 1864 vorausgesagt und im Jahre 1888 von dem erst kürzlich verstorbenen Professor Heinrich Hertz experimentell nachgewiesen wurden.

Hertz war beschäftigt mit Untersuchungen über elektrische Funkenentladungen, von denen man wusste, dass sie unter gewissen Umständen oscillatorischer Natur sind. Jeder Funken kann nämlich unter gewissen Umständen aus einer ganzen Reihe von Funken bestehen, welche denselben Weg hin und zurück mit grosser Regelmässigkeit und ausserordentlicher Geschwindigkeit durchlaufen. Wenn z. B. zwanzig aufeinander folgende Schwingungen vorhanden sind, von denen jede nur ein Hundertmilliontel Secunde dauert¹⁾, so würde

1) Da die Fortpflanzungsgeschwindigkeit der elektrischen Wellen in Luft beziehentlich im Vacuum gleich derjenigen des Lichtes ist (300 000 Kilometer pro Secunde), so kann man aus der bekannten Schwingungszahl auch die Länge einer elektrischen Welle ableiten und zwar mit Hülfe der Regel, dass das Product aus

die ganze Serie nur den fünfmillionten Theil einer Secunde währen und demnach unserem Auge als ein einziger momentaner Funken erscheinen.¹⁾ Beim Experimentiren mit diesen oscillatorischen Funken wurde Hertz dazu geführt, die Störungen zu untersuchen, welche sie im umgebenden Raum verursachen, wobei er fand, dass sie in Gestalt von Wellen sich ausbreiten.²⁾ Um die Hertzschen Resultate beschreiben zu können, muss ich mich einiger Zeichnungen bedienen. Fig. 102 skizzirt den Apparat, der auf dem Tische steht. Um die elektrischen Funken hervorzubringen, bedienen wir uns eines Inductionsapparates. Die elektrischen Entladungen des Ruhmkorffschen Apparates senden wir in die einfache Vorrichtung *AB*, welche von Hertz als „Oscillator“ bezeichnet worden ist. Wie Sie sehen, besteht der Oscillator einfach aus zwei quadratischen Metallplatten,

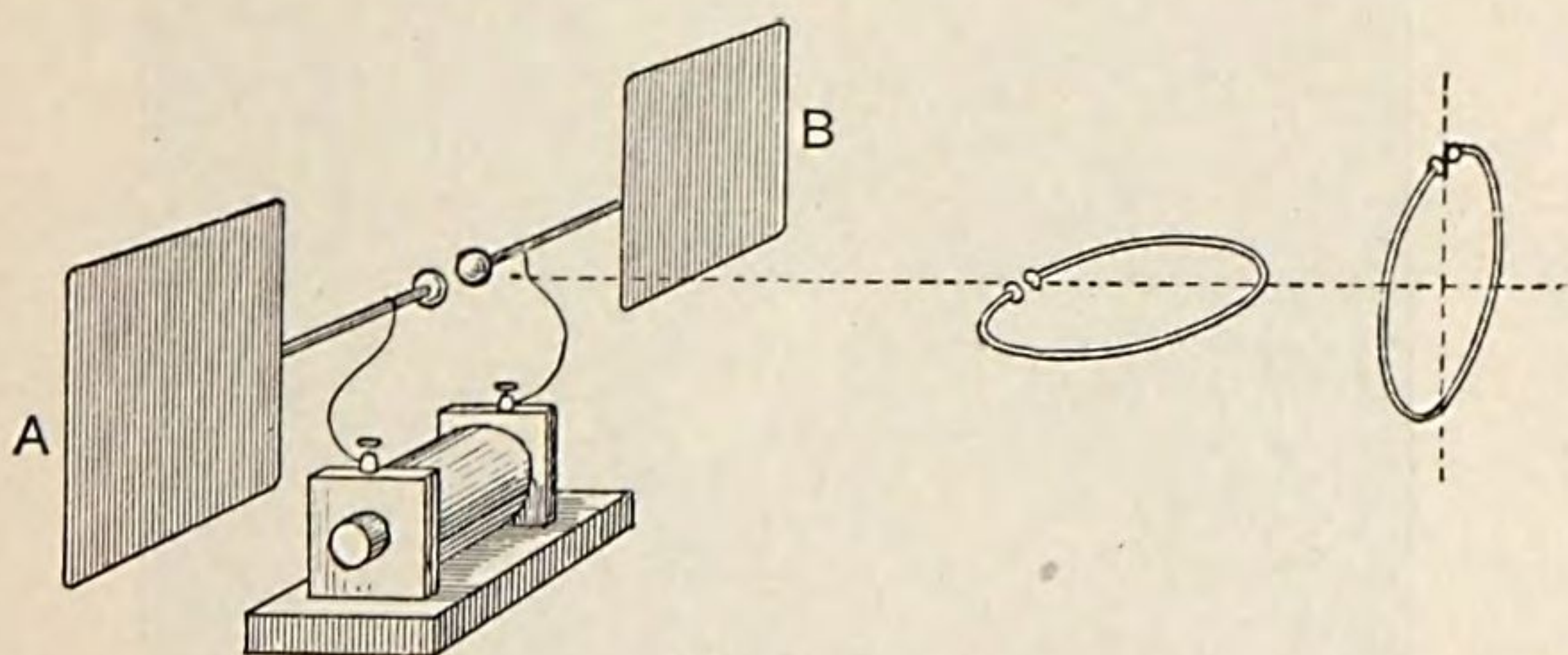


Fig. 102.

welche an zwei Metallstäben befestigt sind, die ihrerseits in zwei hochpolirten Metallkugeln endigen. Zwischen diesen ist aber ein kleiner Zwischenraum, den die Funken überwinden müssen. Jeder solcher Funken besteht in Wirklichkeit aus einer ganzen Anzahl von Schwingungen; die elektrische Entladung geht nicht, wie es den Anschein hat, nur einmal von Kugel zu Kugel, sondern fließt in rascher Aufeinanderfolge hin und her, vom einen Ende des Apparates

Schwingungszahl und Wellenlänge gleich ist der Fortpflanzungsgeschwindigkeit. Im obigen Beispiel ist die Schwingungszahl ein Hundertmilliontel einer Secunde, insofern die Periode ein Hundertmilliontel einer Secunde beträgt; dividiren wir 300 000 000 Meter durch 100 000 000, so erhalten wir als Wellenlänge drei Meter.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Diese oscillatorischen Entladungen einer Leydener Flasche waren auf theoretischem Wege von Maxwell und Kirchhoff festgestellt worden und wurden von Feddersen im Jahre 1858 experimentell dadurch nachgewiesen, dass er die Funkenentladungen im schnell rotirenden Spiegel beobachtete.

2) Anmerkung des Uebersetzers: Schon vor Hertz hatte v. Bezold (Pogg. Ann. 140, S. 54, 1871) die Existenz elektrischer Wellen und deren Interferenz freilich nur in Drahtleitern nachgewiesen. (Vergl. den Anhang zu dieser Vorlesung.)

zum andern und wieder zurück. Nehmen wir einmal an, dass die Secundärspule des Rhumkorffschen Apparates die eine dieser Metallplatten z. B. *A* (Fig. 102) mit positiver Elektricität ladet, während die andere Platte *B* negative Elektricität erhält. Hat die elektrische Spannung die nöthige Höhe erreicht, so wird die Luft zwischen beiden Kugeln von einem Funken übersprungen. Die Ladung eilt von *A* nach *B* und überladet diese, sodass sie *B* mit positiver Elektricität,

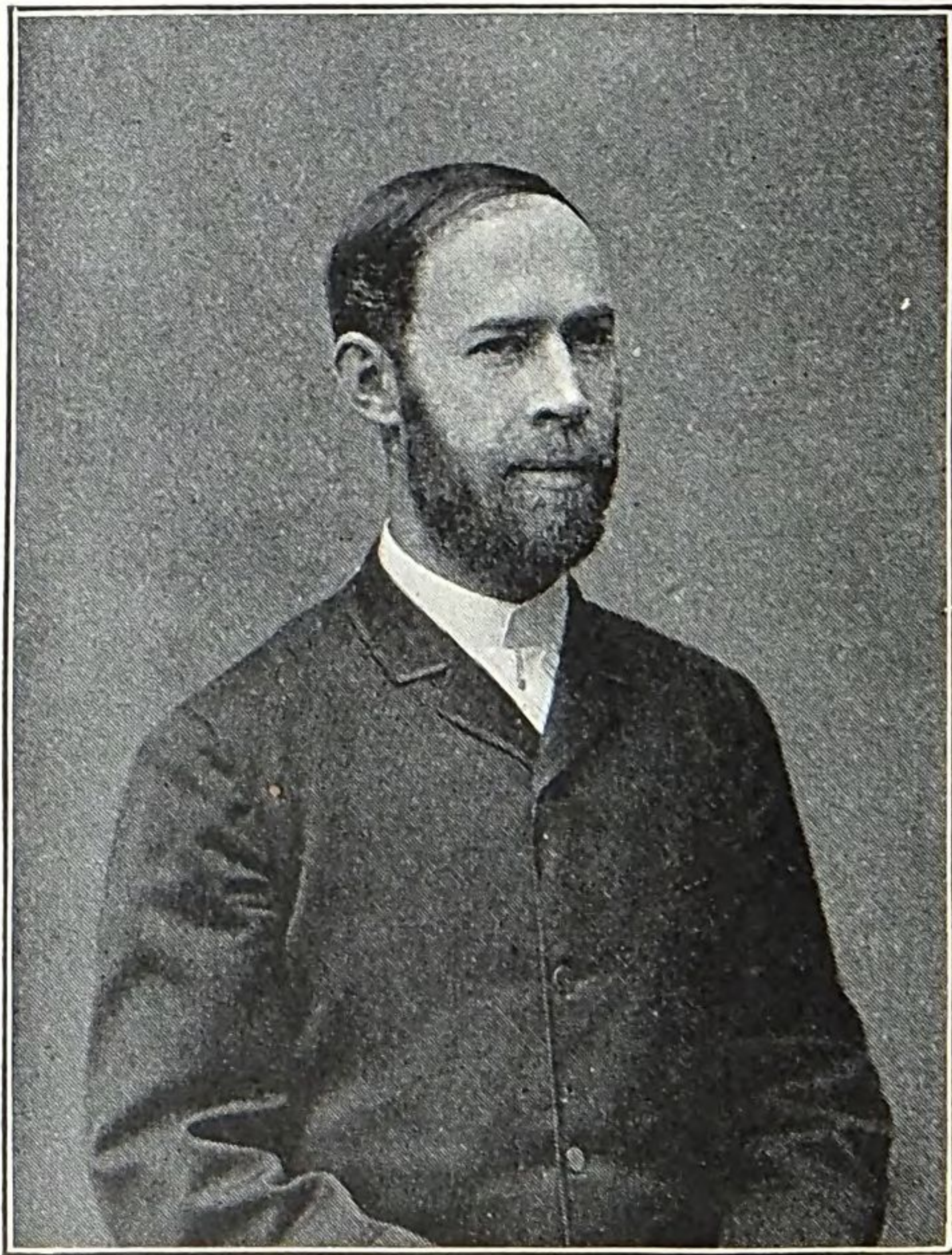


Fig. 103. Professor Heinrich Hertz.

dagegen *A* in negativem Zustand zurücklässt. Hierauf drängt die Ladung wieder zurück von *B* nach *A*, dann wieder von *A* nach *B* und so weiter, wobei jede Oscillation nur etwa den hundertmillionten Theil einer Secunde währt. Die Schnelligkeit der Schwingung hängt ab von der Gestalt und Grösse des Oscillators. Bei jeder Schwingung wird nun vom Apparat in das umgebende Medium eine elektrische Welle gesandt, welche sich in ihm nahe mit der Geschwindigkeit des Lichtes fortpflanzt. Die Welle besitzt ihre grösste Intensität in senkrechter Richtung zu den Metallstäben und zu den Metallplatten, zwischen denen die Elektricität oscillirt. Fig. 104 giebt eine Vorderansicht des Oscillators und zeigt auch den Hertzschen „Reso-

nator“, d. h. das Instrument, welches Hertz anwandte, um das Vorhandensein elektrischer Wellen im Luftraum nachzuweisen. Das Modell hier auf dem Tische ist in derselben Grösse ausgeführt wie der kleinere der von Hertz angewandten Oscillatoren; bei ihm messen die beiden Metallplatten 40 cm im Quadrat und besitzen eine gegenseitige Entfernung von 60 cm. Die Länge der von diesem Oscillator ausgesandten Wellen hat eine Grösse von ungefähr drei Metern. Der Resonator oder Analysator ist ein einfacher Draht, der in eine kreisförmige Form gebogen ist und an den beiden Enden kleine Kugeln trägt. Um nachzuweisen, dass sich vom Oscillator Wellen in den umgebenden Raum ausbreiten, brachte Hertz den Resonator in einige Entfernung vom Oscillator und beobachtete die winzigen Fünkchen, welche von den Wellen im kreisförmig gebogenen Draht inducirt werden. Damit aber Funken zwischen den Kugeln des Resonators

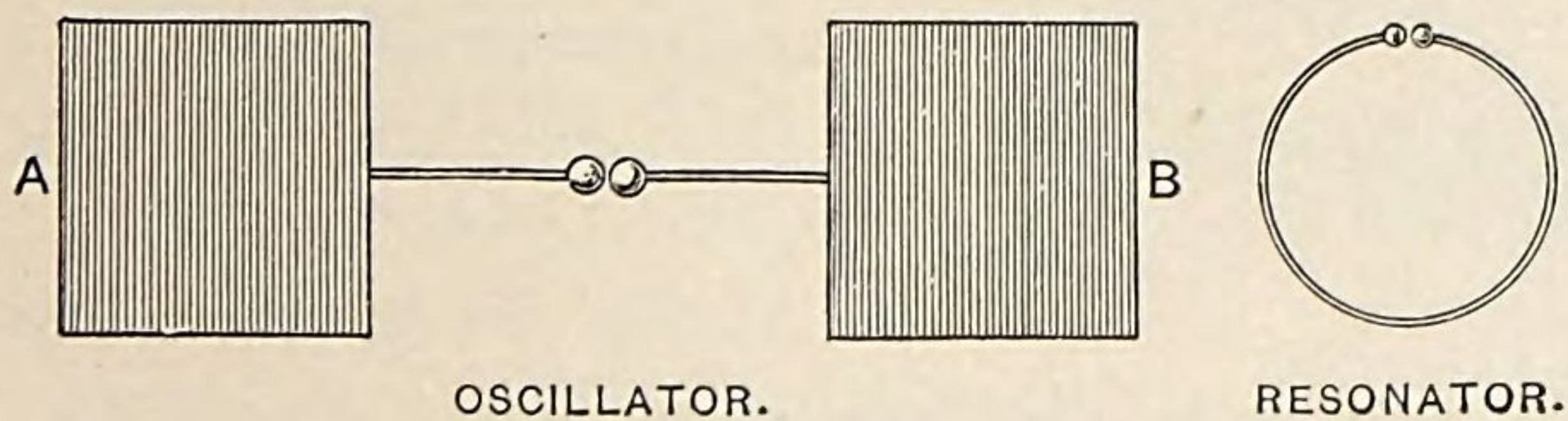


Fig. 104.

überspringen, muss der Resonator eine passende Gestalt haben und in die richtige Lage gebracht werden. Die Grösse (in unserem Falle besitzt der Kreis einen Durchmesser von 70 cm) muss so gewählt sein, dass die natürliche Periode der Schwingungen eines den Ring durchlaufenden elektrischen Stromes genau übereinstimmt mit der Periode der vom Oscillator in den Luftraum ausgesandten Wellen. Die Lage muss ferner derartig gewählt sein, dass die vom Oscillator kommenden Wellen den Resonator in Schwingung versetzen und in ihm secundäre Schwingungen erregen können. Wird der Resonator vertical und mit seiner Ebene senkrecht zur Verbindungslinie *AB* gestellt, so entstehen in ihm keine Funken: Die Wellen strömen einfach am Resonator vorbei. Hält man jedoch den Resonator horizontal und zwar so wie es Fig. 102 zeigt, so können Funken zwischen seinen Kugeln bemerkt werden.

Hertz stellte nun an das äusserste Ende seines Versuchsraumes einen grossen Metallschirm als reflectirende Wand, ging dann in verschiedene Entfernungen zwischen Oscillator und Wand und suchte mittels des Resonators die Stellen auf, an denen Funken zwischen

seinen Kugeln übersprangen. So gelang es ihm nachzuweisen, dass die in Folge des Schirmes in sich selbst zurückgeworfenen Wellen Knotenpunkte besitzen ähnlich wie in dem Falle, wo man Schallwellen oder Lichtwellen in sich reflectiren lässt. Diese Knotenpunkte haben eine gegenseitige Entfernung von genau einer halben Länge der benutzten Welle; aus der gemessenen Entfernung erhält man also sehr genau die Länge der elektrischen Wellen.

Schon vor Hertz war es bekannt, dass die Funken oscillirender Natur sind. Fig. 105 illustriert die Experimente, welche ich selbst im Jahre 1876 über diesen Gegenstand angestellt habe.¹⁾ Ich hatte eine Inductionsrolle mit einem aus dem Dielectricum D zwischen den beiden Metallplatten P und Q bestehenden Condensator ver-

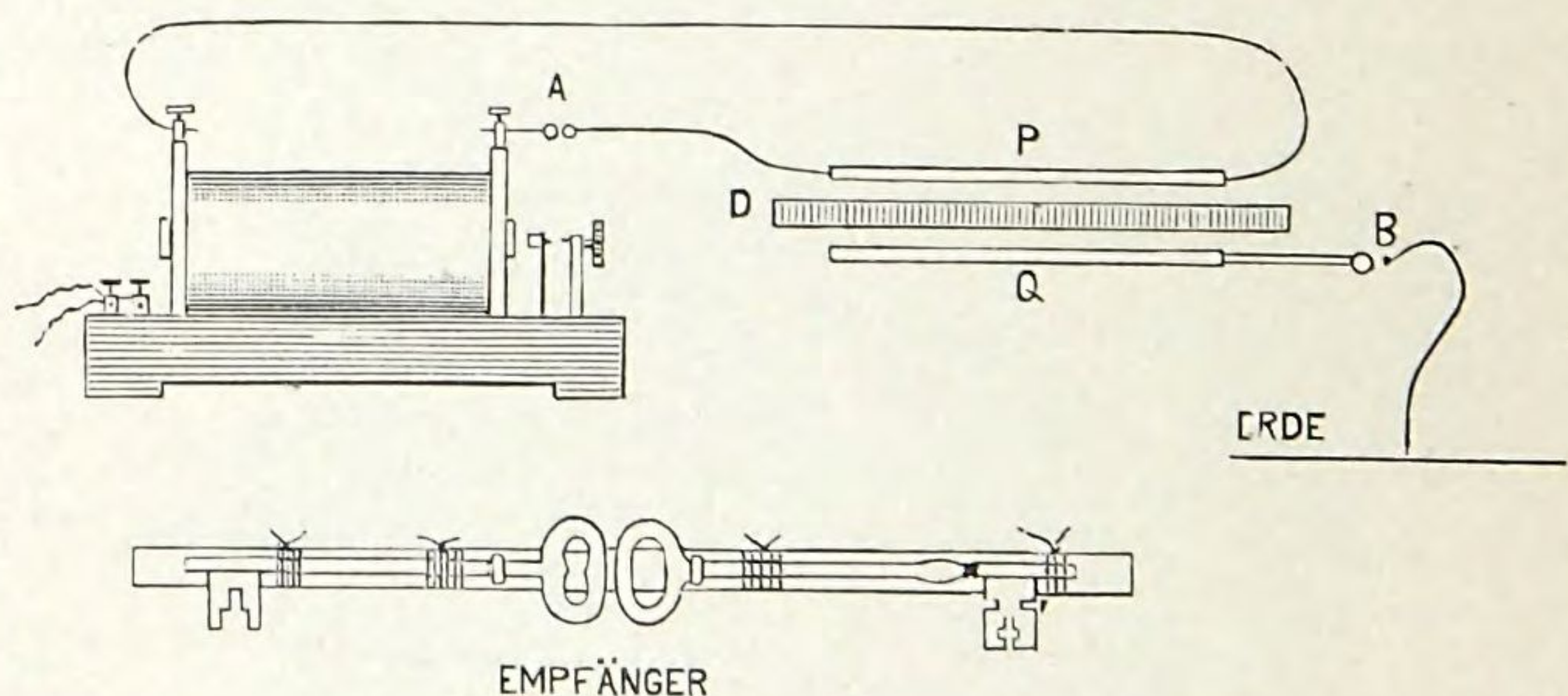


Fig. 105.

bunden, um in der kleinen Luftstrecke A Funken zu erhalten. Ich fand, dass beim Vorhandensein dieser Funkenstrecke A auch secundäre Funken bei B aus der Aussenbelegung des Condensators gezogen werden konnten; mit Hülfe einer Geisslerschen Röhre und eines rotirenden Spiegels konnte ich erkennen, dass diese Funken oscillatorischer Natur waren.²⁾ Bei diesem Arrangement gelang es mir aber auch, Funken von isolirten, metallischen Objecten im Zimmer zu erhalten, ja diese Funken konnten ringsherum im Zimmer nachgewiesen werden. Ich brauchte nur mein Messer an die Thürklinke oder an andere metallische Gegenstände zu halten um Funken hervorzuzaubern. Ich machte auch folgendes Experiment: Ich nahm zwei Schlüssel und befestigte dieselben auf einem Stück Holz, sodass sie

1) Philosophical Magazine, September 1876.

2) Anmerkung des Uebersetzers: Vergleiche die auf Seite 147 gemachte Anmerkung über die von Feddersen 1861 angestellten Versuche über die oscillatorische Entladung der Leydener Flasche.

sich beinahe berührten; ging ich mit diesem „Analysator“ im Zimmer herum, so erhielt ich an verschiedenen Stellen Funken. Aber niemals kam mir der Gedanke, dass diese Funken ein Beweis für die Existenz elektrischer, im Raum sich ausbreitender Wellen seien. Diese Entdeckung gebührt Heinrich Hertz! Er ging nicht nur im Zimmer herum, irgendwo Funken zu erhaschen, sondern suchte mit Absicht und Ueberlegung die Stellen auf, wo die Funken auftreten mussten und hielt seinen Resonator in die richtige Lage, um die Knotenpunkte zu entdecken.

Gestatten Sie mir noch ein Wort über die elektrische Schwingung selbst. Jede plötzliche Entladung des Inductoriums — um die Entladung plötzlich zu erhalten, müssen die Kugeln der Funkenstrecke sehr gut polirt sein — bringt eine Reihe von Schwingungen hervor, welche mit der Zeit abklingen (skizzenhaft in Fig. 106 dargestellt).

Als mechanisches Analogon erinnern wir uns der Schwingungen einer Stahlfeder. Man biege dieselbe auf eine Seite und lasse sie dann schnell los. Sie schwingt oftmals hin und her, um nach einiger Zeit in ihre ursprüngliche Ruhelage zurückzukehren. Aehnliche Wellenzüge gehen von einem elektrischen Funken aus; auch diese

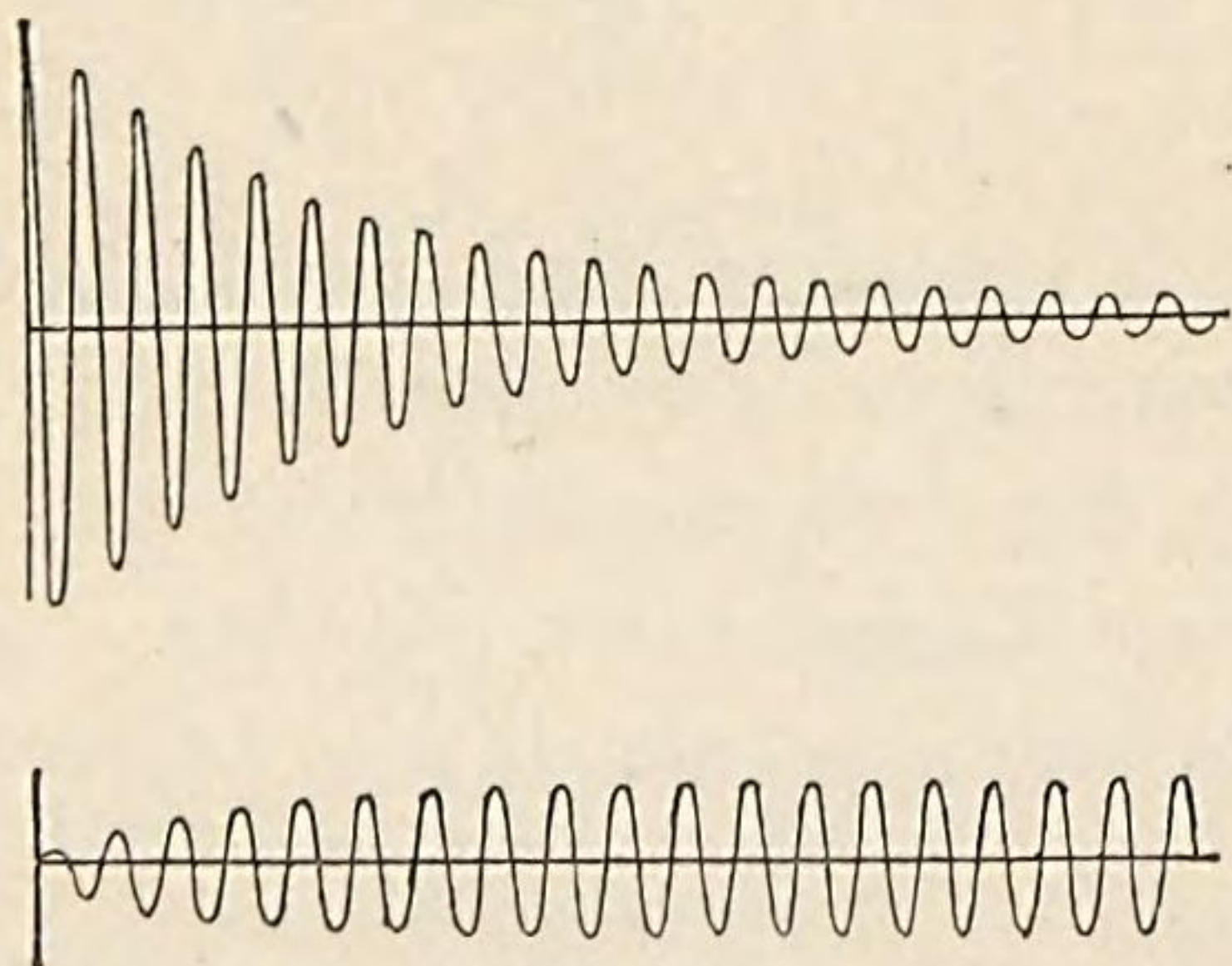


Fig. 106.

sterben beim Durcheilen des Raumes allmählich ab. Treffen sie aber auf einen geeigneten Resonator oder Analysator, dann rufen sie in ihm durch ihre periodischen Impulse eine elektrische Schwingung hervor, deren Oscillationen an Intensität zunehmen, falls immer von Neuem Wellen auf den Resonator einwirken. Dieser Vorgang soll durch die untere Curve in Fig. 106 angedeutet werden. Es ist dieser Vorgang ganz ähnlich dem, wo die von einer Stimmgabel ausgehenden Schallwellen beim Auftreffen auf eine zweite, auf denselben Ton abgestimmte, Stimmgabel diese zur Mitschwingung erregen und zum Tönen bringen.

In Fig. 107 sind die parabolischen Spiegel von etwa $1\frac{1}{2}$ Meter Höhe abgebildet, deren sich Hertz bediente, um die Reflexion der elektrischen Wellen nachzuweisen. Im Brennpunkt des einen Spiegels wurde in verticaler Richtung ein Oscillator aufgestellt, welcher Funken von auf- und abwärtsschwingender Richtung erzeugte; die resultirenden Wellen waren also in einer verticalen Ebene polarisirt.

Diese von dem zugehörigen Spiegel reflectirten Wellen fielen auf den zweiten Spiegel, welcher sie in seinem Brennpunkt sammelte. Hier befand sich der Resonator, welcher in diesem Falle aus zwei geradlinigen Drähten mit einer Funkenstrecke bestand, an der die entstehenden Funken beobachtet werden konnten.

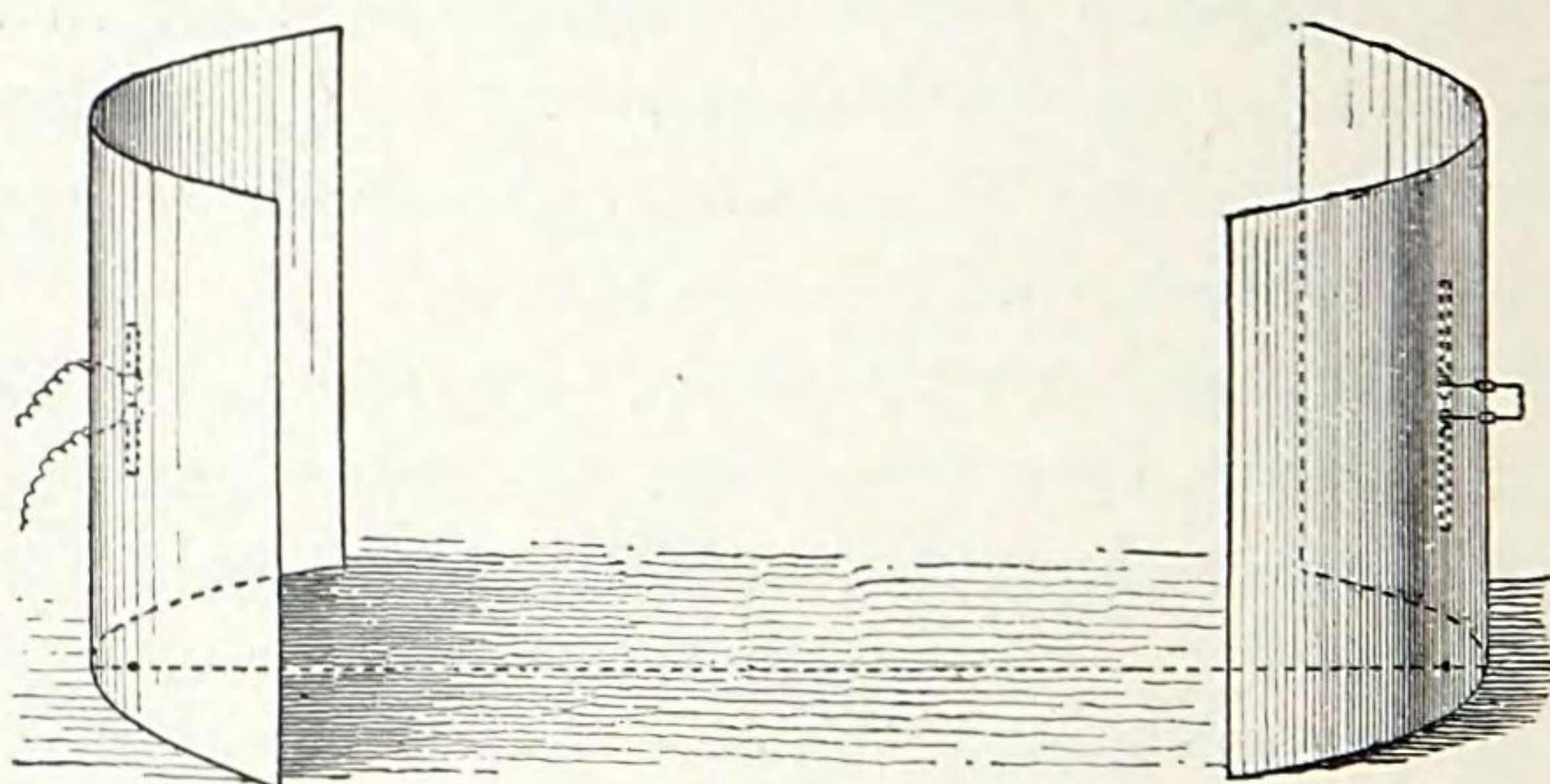


Fig. 107.

Seitdem sind mannigfache Formen von Oscillatoren zur Erzeugung elektrischer Wellen construirt worden, von denen einige in Fig. 108 abgebildet sind. Die erste Form ist eine jener, deren sich Hertz selbst bediente. Hier sind statt der flachen Metallplatten cylindrische metallische Leiter benutzt. Bei dem nächsten Oscillator

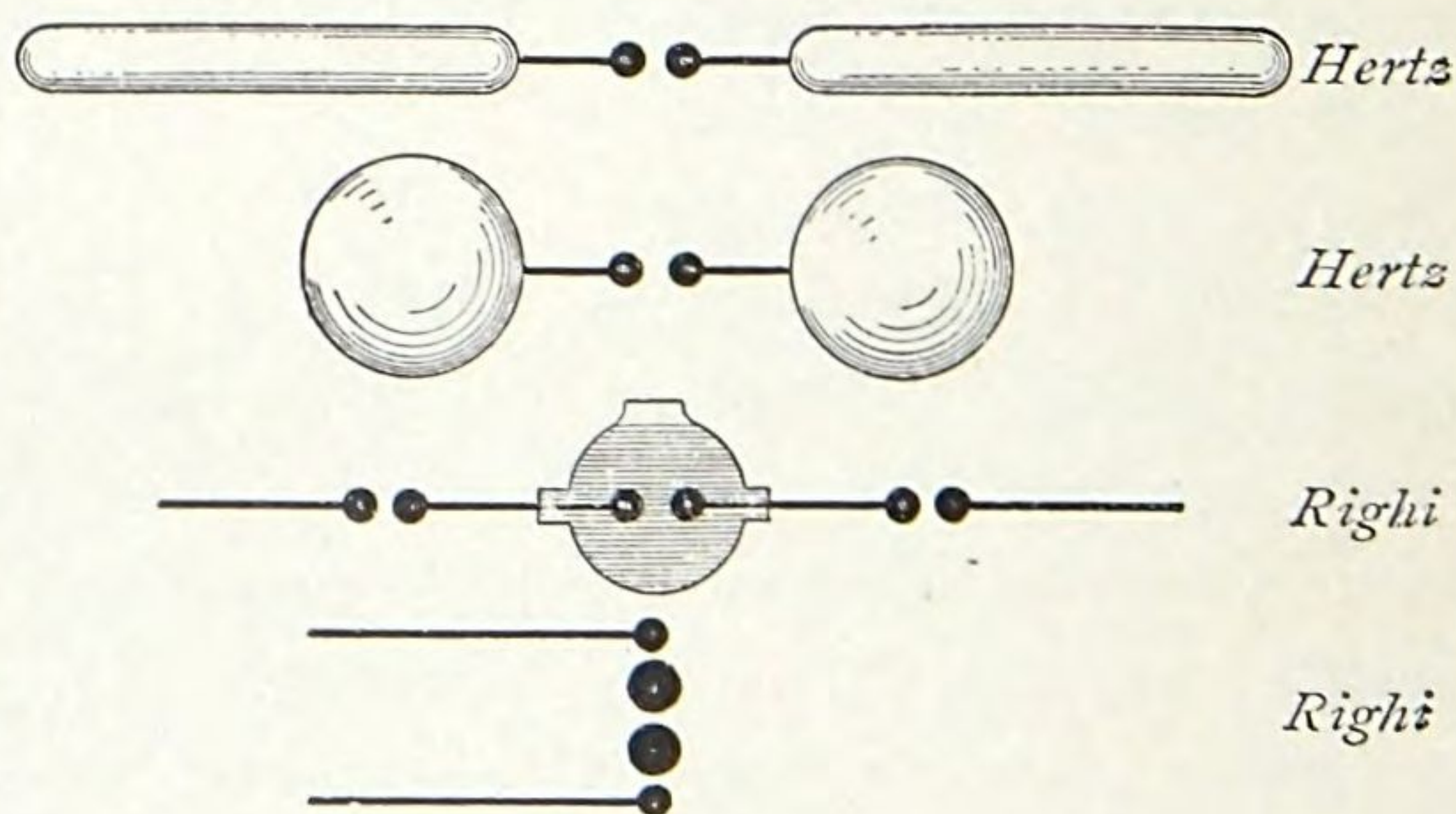


Fig. 108.

finden zwei grosse Metallkugeln Verwendung. In beiden Fällen war die Funkenstrecke zwischen zwei kleinen hochpolirten Metallkugeln genau in der Mitte der Länge des Oscillators angeordnet. Die dritte Form hat Professor Righi angewandt, um sehr kleine elektrische Wellen zu erhalten. Bei ihr sind drei Funkenstrecken vorhanden, von denen die mittlere mitsammt den zugehörigen Kugeln in Oel eingebettet ist, und zwar um eine vorzeitige Entladung zu verhindern. Die unterste Form rührt ebenfalls von Professor Righi her. Sie

stellt die Form dar, mit welcher Righi die sehr kleinen Wellen von unter ein Centimeter Länge erhalten hat; bei diesem Oscillator gehen die Schwingungen von den mittleren Kugeln aus, auf welche die Funken von zwei kleineren Kugeln, zu beiden Seiten der grossen befindlich, überspringen.

Die nächste Fig. 109 stellt zwei von Professor Oliver Lodge in Liverpool gebrauchte Oscillatoren dar. Hier ist eine gut polirte Kugel zwischen zwei kleineren montirt, von denen sie nahe berührt wird. Lässt man eine Entladung auf die mittlere Kugel übergehen, so drängt sich in dieselbe mit grosser Heftigkeit von Seite zu Seite eine elektrische Ladung; aber schon nach drei oder vier solchen An-

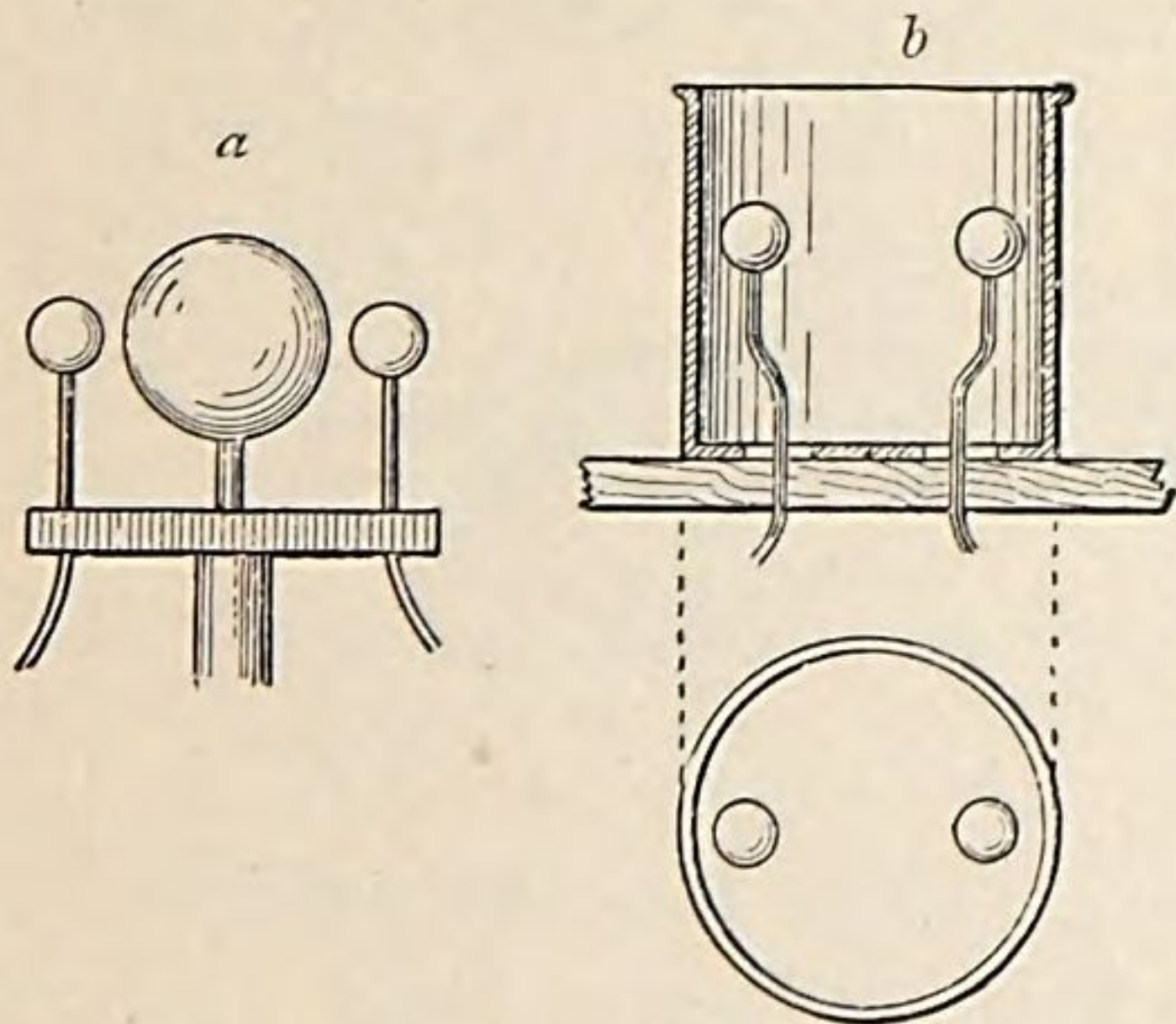


Fig. 109.

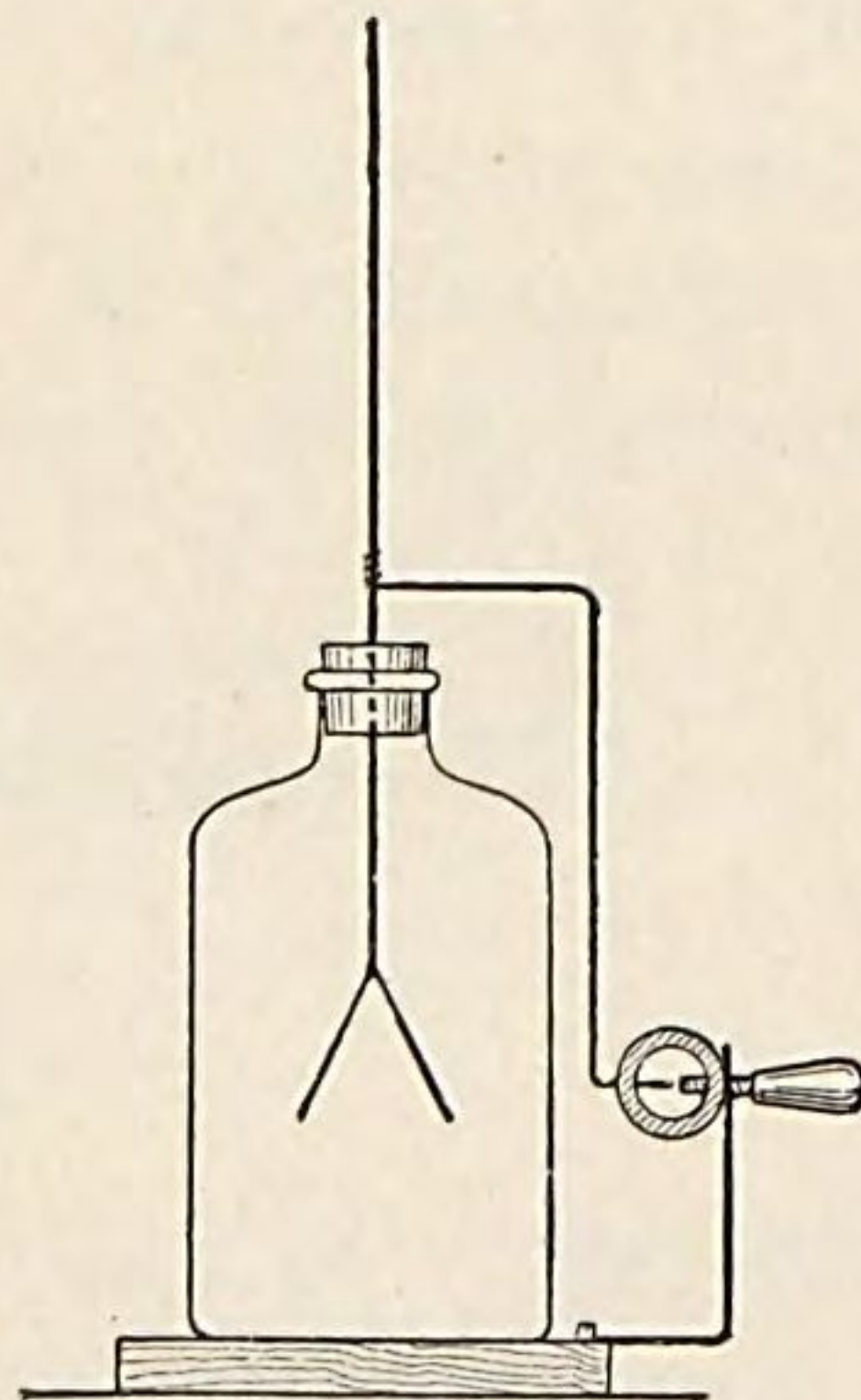


Fig. 110.

griffen (surings) stirbt die Bewegung ab, da sie ihre Energie leicht in den Raum hinaus strahlt. Sie sendet keine lange Reihe von Wellen aus, da die Wirkung schon nach $1\frac{1}{2}$ — 2 vollständigen Schwingungen abgestorben ist; die Länge der ausgesandten elektrischen Wellen ist ungefähr $1\frac{1}{2}$ mal so gross wie der Durchmesser der Kugel. Die andere Form (Fig. 109b) zeigt einen Metallcylinder, auf welchen an den entgegengesetzten Enden eines Durchmessers von zwei Metallkugeln Funken überspringen. Dieser Oscillator sendet seine Energie weniger plötzlich aus und seine Schwingungen dauern länger an. Er erzeugt Wellenzüge, welche hauptsächlich gerade nach oben aus dem Cylinder strömen.

Fig. 110 illustriert eine der einfachsten Methoden, die elektrischen Wellen nachzuweisen und sie gleichzeitig einem grossen Auditorium zu demonstrieren. Ein gewöhnliches Goldblatt-Elektroskop ist mit einem Nebenschluss aus Draht versehen, in welchem eine kleine Funkenstrecke eingeschaltet ist, deren Grösse mittels einer

Schraube beliebig geändert werden kann. Sind die Goldblättchen sorgfältig geladen, so behalten sie ihre Divergenz bei, weil ihre elektrische Spannung nicht so gross gewählt ist, um die Funkenstrecke zu überspringen. Sobald aber elektrische, am besten vertical polarisirte Wellen eines Hertzschen Resonators auf das Elektroskop fallen, entsteht im Drahtnebenschluss ein elektrischer Druck, welcher die Funkenstrecke in Gestalt eines kleinen Funkens überwindet. Während der Zeit, dass der Funken die Luftstrecke durchbricht, entladen sich die Goldblättchen und fallen zusammen.

Ein noch empfindlicherer, von Oliver Lodge benutzter Resonator besteht aus einer mit losen Eisenfeilspähnen gefüllten Glasröhre (Fig. 111), welche in den Stromkreis eines Accumulators geschaltet wird, der ausserdem ein Galvanometer enthält. Lose Metallspähne oder Metallpulver sind an und für sich sehr schlechte Leiter der Elektrizität, sodass durch sie kaum ein starker elektrischer Strom

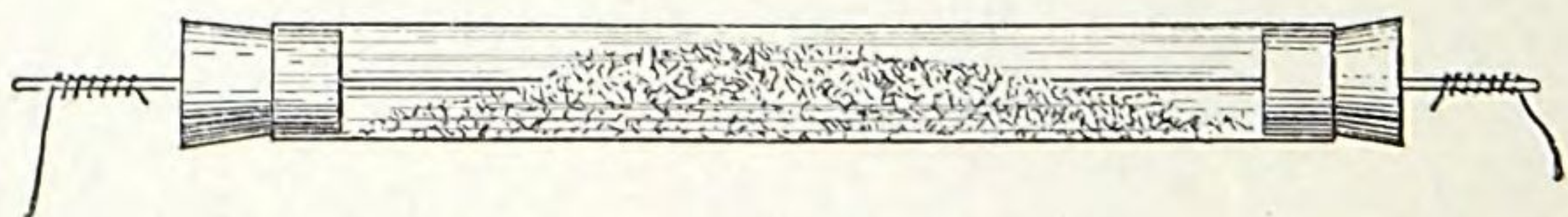


Fig. 111.

hindurchgeht. Sobald aber auf diese Röhre eine elektrische Welle fällt, leiten die Eisenfeilspähne, wie Herr Branly 1890 entdeckte,¹⁾ den Strom ganz ausgezeichnet. Dementsprechend tritt eine Bewegung

1) Anmerkung des Uebersetzers: Unabhängig von Branly hat Herr Aschkinass einen ähnlichen elektrischen Resonator entdeckt (Wied. Ann. Bd. 57, 1896). Stellt man sich aus einem dünnen Stanniolblatt einen gitterartigen Widerstand her, indem man in dasselbe parallele Schnitte abwechselnd von oben nach unten macht, so aber, dass die einzelnen Streifen einen zusammenhängenden langen Streifen bilden, die ein elektrischer Strom hintereinander durchlaufen muss, so zeigt dieser Widerstand ein eigenthümliches Verhalten gegenüber den schon mehrfach besprochenen elektrischen Hertzschen Schwingungen. Behandelt man nämlich ein solches Stanniolgitter ähnlich einem Bolometer, indem man es in der Wheatstoneschen Brückencombination anstatt den Wärmestrahlen den „elektrischen“ Strahlen aussetzt, so zeigt es, wie Herr Aschkinass zuerst beobachtet hat, nach Einwirkung derselben eine dauernde bedeutende Widerstandsänderung, welche erst wieder verschwindet, sobald man das Stanniolgitter schüttelt. Analog wirkt die Röhre mit dem Eisenfeilicht. Es werde hierzu bemerkt, dass der Italiener Marconi neuerdings diesen Eisenfeilichtresonator wesentlich verbessert hat, indem er ihn umconstruirte und mit einem automatischen Hammerwerk versah, welches nach jeder Bestrahlung den Resonator anschlägt und ihn so für eine neue Welle empfindlich macht. So gelang es Marconi schon auf recht beträchtliche Entfernungen hin zu telegraphiren und zwar ohne Draht.

des Galvanometerspiegels ein und der Lichtfleck wandert; ein deutliches Zeichen, dass eine elektrische Welle die Röhre getroffen hat.

Fig. 112 zeigt die Versuchsanordnung, deren sich Professor Lodge bediente, um die Versuche von Hertz zu wiederholen und zu zeigen, dass die elektrischen Wellen dieselben Eigenschaften wie die Lichtwellen haben. Hertz verwandte als Spiegel Parabolspiegel von $1\frac{1}{2}$ Meter Höhe und zeigte die Brechung an grossen Prismen aus Pech. Er fand, dass die elektrischen Wellen hölzerne Thüren und steinerne Wände mühelos durchdringen. Er wies auch deren Polarisation und Beugung nach. Lodge vermochte diese Experimente mit weniger riesenhaften Apparaten zu wiederholen. Der Wellenerzeuger bestand aus einem Oscillator (Fig. 109 a), dessen grössere Kugel einen Durchmesser

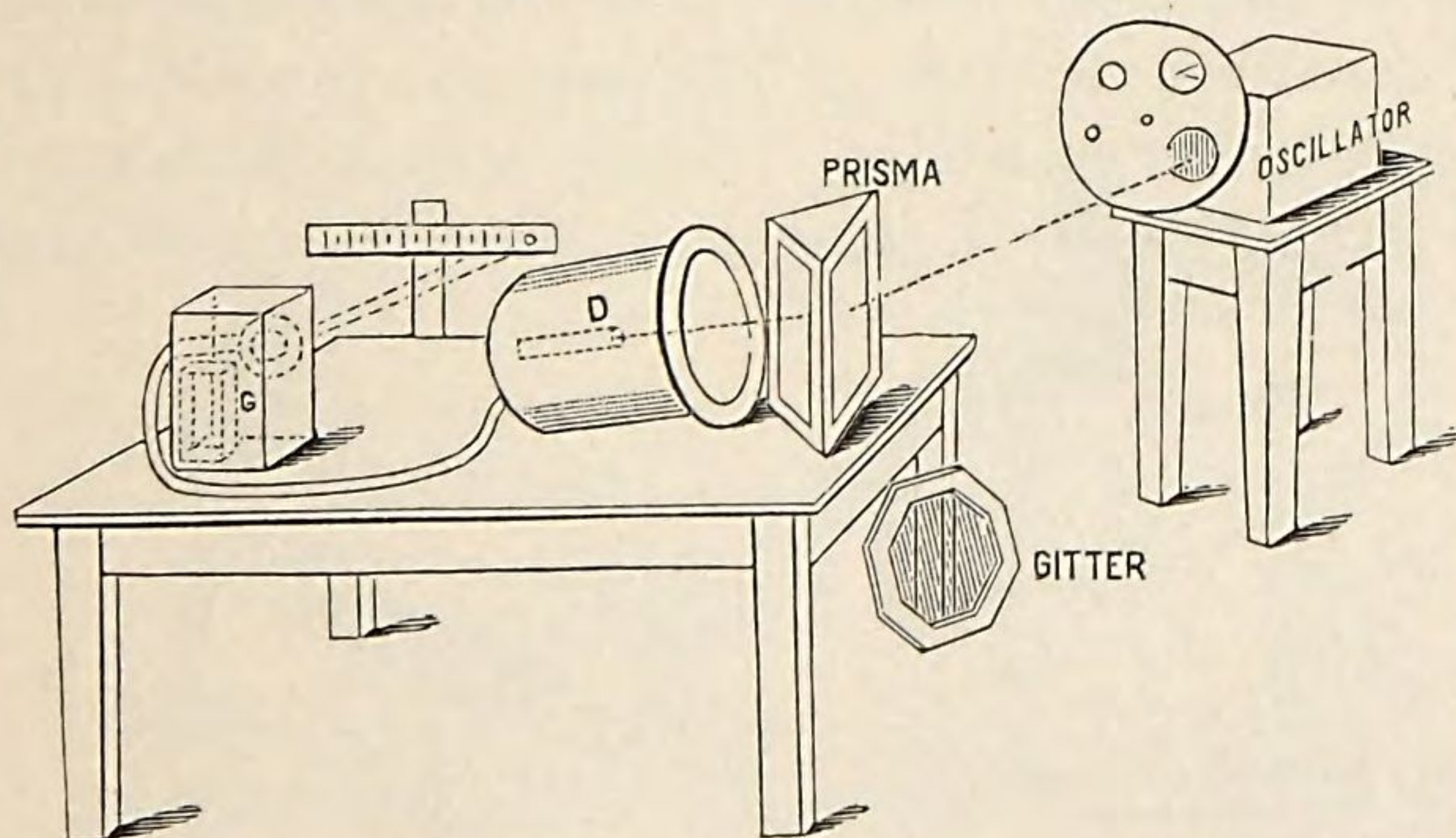


Fig. 112.

von 12 cm hatte und welcher Wellen von nur 20 cm Länge aussandte; die Kugeln waren eingeschlossen in eine Büchse aus Kupfer, an welcher sich ein Metallschirm mit Löchern von verschiedener Grösse befand, um die Stärke der Strahlung beliebig ändern zu können. Als Resonator (*D* in Fig. 112) benutzte er die erwähnte mit Eisenfeilspähnen gefüllte Röhre, welche er am Boden einer kupfernen Haube befestigte, durch deren offenes Ende die elektrischen Wellen zur Röhre gelangten. Die Drähte des Resonators führen zum Galvanometer *G* und sind in eine Metallbüchse eingeschlossen, damit sie vor directer Strahlung geschützt sind. Ist der Resonator schief zum Oscillator gestellt, sodass dessen Wellen am Resonator vorbeigehen, so erhalten wir am Galvanometer auch keinen Ausschlag. Werden aber durch Spiegelung die Wellen in die Mündung des Resonators dirigirt, und zwar indem man vor den Oscillator unter geeignetem Winkel ein Metallblech hält, so wird der Resonator, wie Sie sehen,

sofort erregt, das Galvanometer giebt hiervon Rechenschaft und der Lichtfleck wandert. Statt der reflectirenden Metallwand können wir, wie es Fig. 112 zeigt, auch ein Prisma aus Paraffin benutzen und die elektrischen Wellen durch Brechung in die Mündung des Resonators schicken. In der Figur ist auch ein Gitter aus Metall abgebildet, welches dazu dient, um die Wellen zu polarisiren.

Jünger als die Untersuchungen von Lodge sind diejenigen von Professor Righi; der von ihm angewandte Apparat ist in Fig. 113 dargestellt und besteht aus zwei Theilen, einem Oscillator und einem Resonator. Als Wellenerzeuger dient der in Fig. 108 zu unterst dargestellte Oscillator, der drei Funkenstrecken besitzt, von denen die mittlere fein justirt werden kann. In Fig. 113 befindet sich diese Funkenstrecke innerhalb der mit Vaseline gefüllten Büchse *V* aus

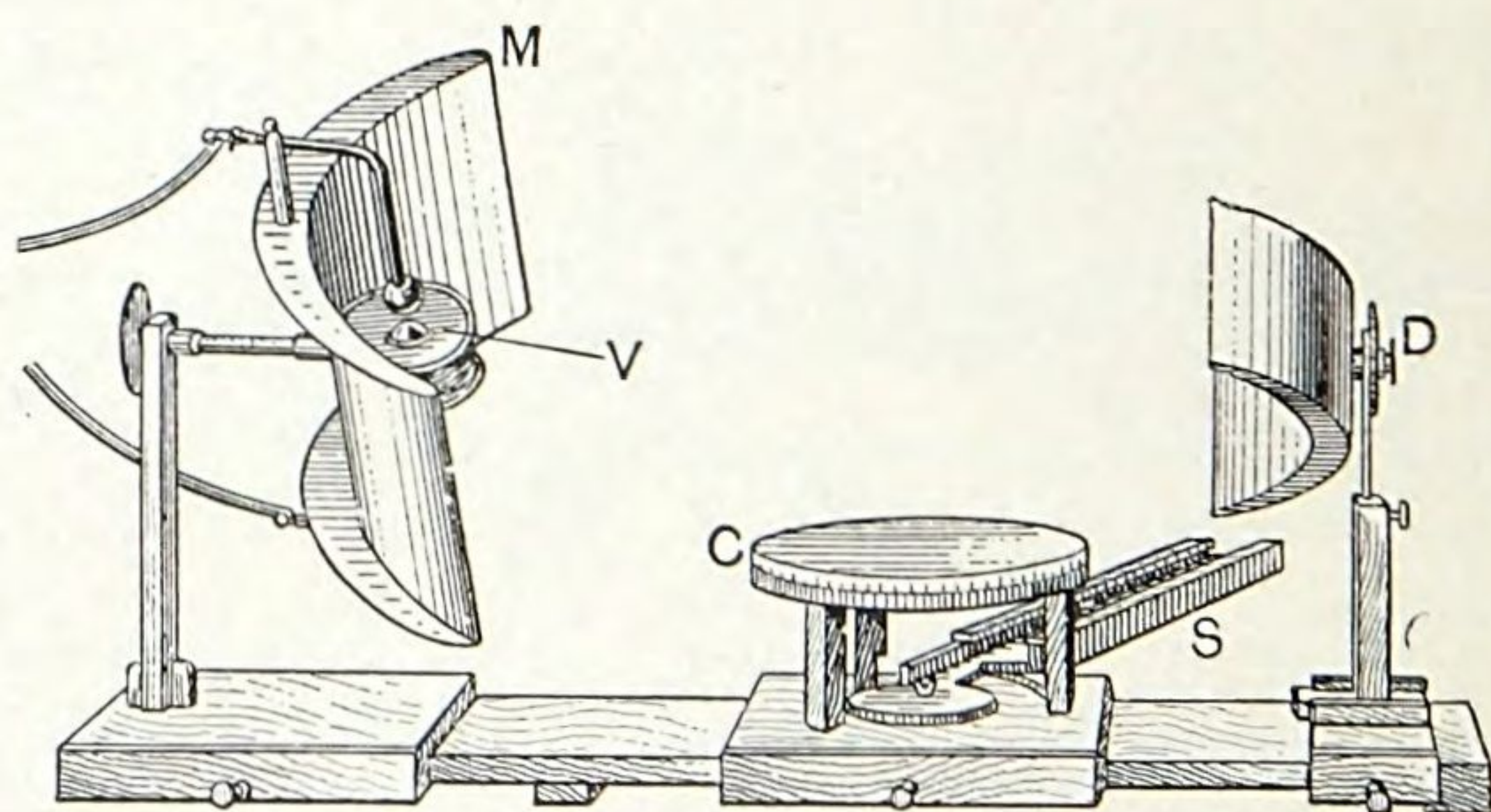


Fig. 113.

Leder, unterhalb deren die in der Figur nicht gezeichnete dritte Kugel steht. Dieser Oscillator befindet sich im Brennpunkt des Parabolspiegels *M*, welcher die entstehenden elektrischen Wellen nach rechts zum Tische *C* reflectirt. Der ebenfalls mit einem Parabolspiegel versehene Empfänger *D* besteht aus einer auf einer Glasplatte niedergeschlagenen Silberschicht, welche durch einen Diamant in der Mitte in zwei Theile getheilt ist. Die Funken durchsetzen diese winzige Funkenstrecke und werden mittels einer Lupe bei *D* beobachtet. Der Apparat ist klein genug, um auf einem gewöhnlichen Tisch Platz zu finden und hat ganz das Aussehen eines zu optischen Versuchen dienenden Apparates. Auf dem mittleren Tisch *C* können Spiegel, Prismen, Linsen, Gitter und alle anderen Hülfsapparate aufgebaut werden. Mit diesen neuen Hilfsmitteln war Professor Righi im Stande, elektrische Wellen von weniger als 1 cm Länge nachzuweisen. Es gelang ihm, die Interferenz mit Hülfe

der Fresnelschen Spiegel und des Biprismas und ebenso die Beugung der elektrischen Wellen darzuthun. Ferner vermochte er die Gesetze der Brechung, der Spiegelung, der totalen Reflexion, der linearen sowohl wie der elliptischen und cirkularen Polarisation zu demonstrieren. Auch untersuchte er die Durchlässigkeit verschiedener Substanzen, speciell die selective Durchlässigkeit von Holz in Richtung der Faser und quer zu derselben; aus diesem Versuche folgte, dass Holz die elektrischen Wellen in ähnlicher Weise zu polarisiren vermag, wie der Turmalin die Lichtwellen polarisirt. Righi vervollständigte so die Beweise dafür, dass die elektrischen Wellen alle Eigenschaften besitzen, welche wir an den gewöhnlichen sichtbaren Lichtwellen kennen gelernt haben. Andere Experimentatoren haben in derselben Richtung weiter gearbeitet. Vor Kurzem haben wir

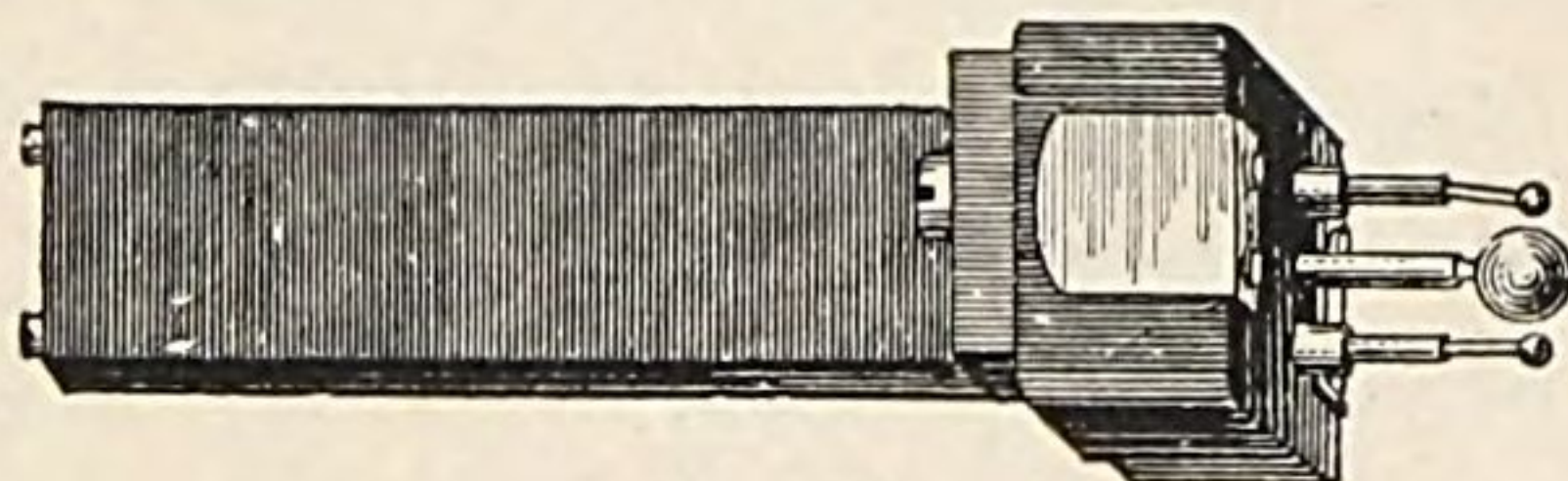


Fig. 114.

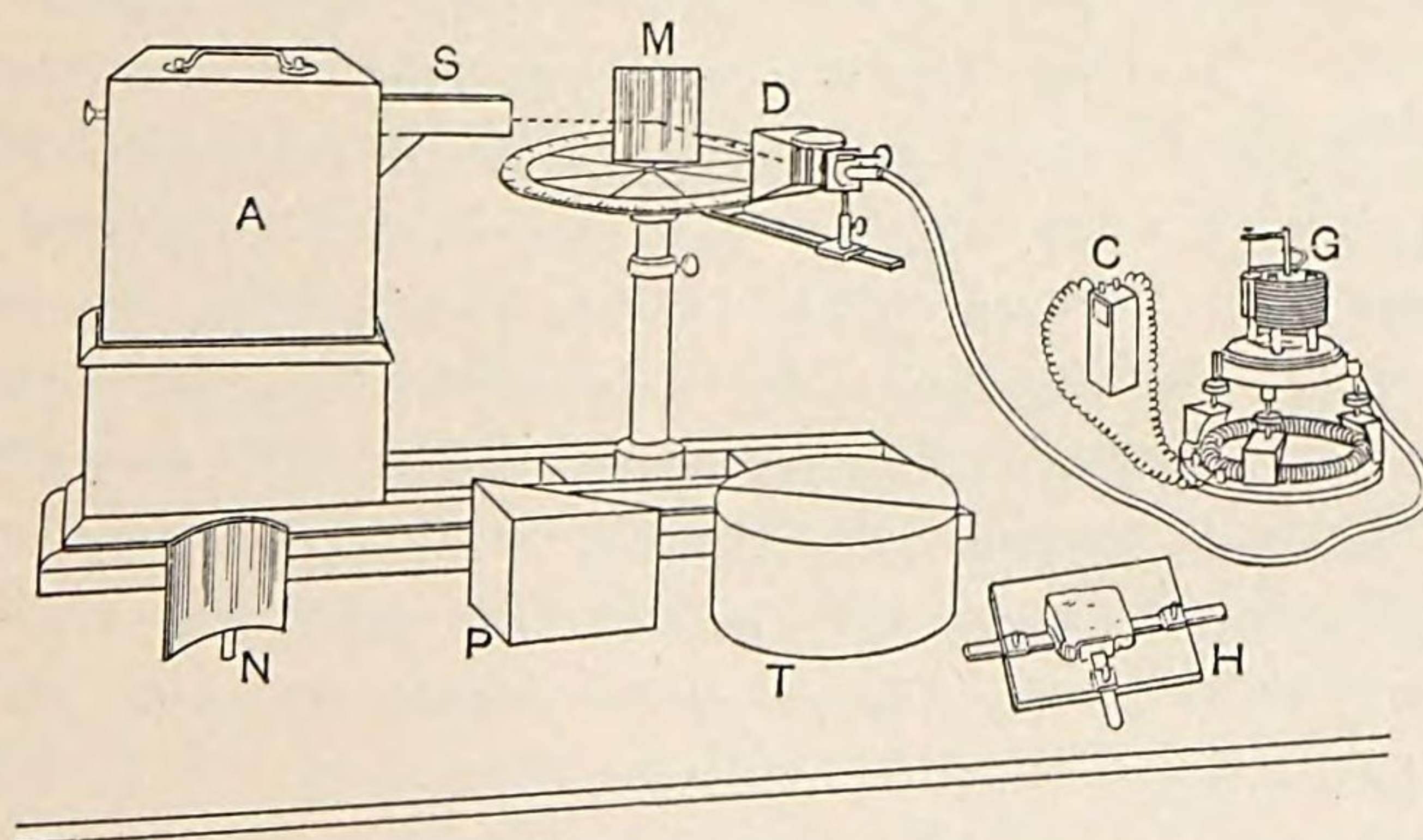


Fig. 115.

z. B. von Professor J. Chunder Bose aus Calcutta¹⁾ einen Vortrag über die elektrischen Wellen gehört, bei welcher Gelegenheit er

1) Professor Boses Oscillator ist in Fig. 114 abgebildet; er besteht aus zwei kleinen Platinkugeln zwischen zwei noch kleineren Kugeln. Einzelne Funken werden demselben von einem kleinen Inductorium mitgetheilt. Eine cylindrische Linse aus Ebonit vor dem Oscillator macht die entstehenden Wellen einander parallel. Der vollständige Apparat ist in Fig. 115 abgebildet. Der in eine Metallbüchse eingeschlossene Funkengeber ist durch eine doppelte Metallhülle geschützt, welche sowohl die Batterie als auch das Element enthält. Der Resonator *D* besteht aus einer ganzen Anzahl kleiner Metallspiralen, welche sanft gegen einander gepresst sind und vom Strom einer einzigen Zelle durchflossen werden, in deren

seinen ausserordentlich eleganten Apparat vorführte, mit dem er ebenfalls sehr kurze Wellen erhält.¹⁾

Ehe ich diese Vorlesung schliesse, will ich Ihnen einige Wirkungen der elektrischen Wellen durch das Experiment vorführen. Hier befindet sich in einer Metallhülle ein kleines Inductorium, welches von zwei galvanischen Elementen gespeist wird. Der inducirte Strom wird einem kleinen Oscillator zugeleitet, welcher dem von Lodge ähnelt und aus einer kurzen polirten Platinröhre (Fig. 116) von 4 mm Durchmesser besteht, die zwischen zwei kleinen Platin-

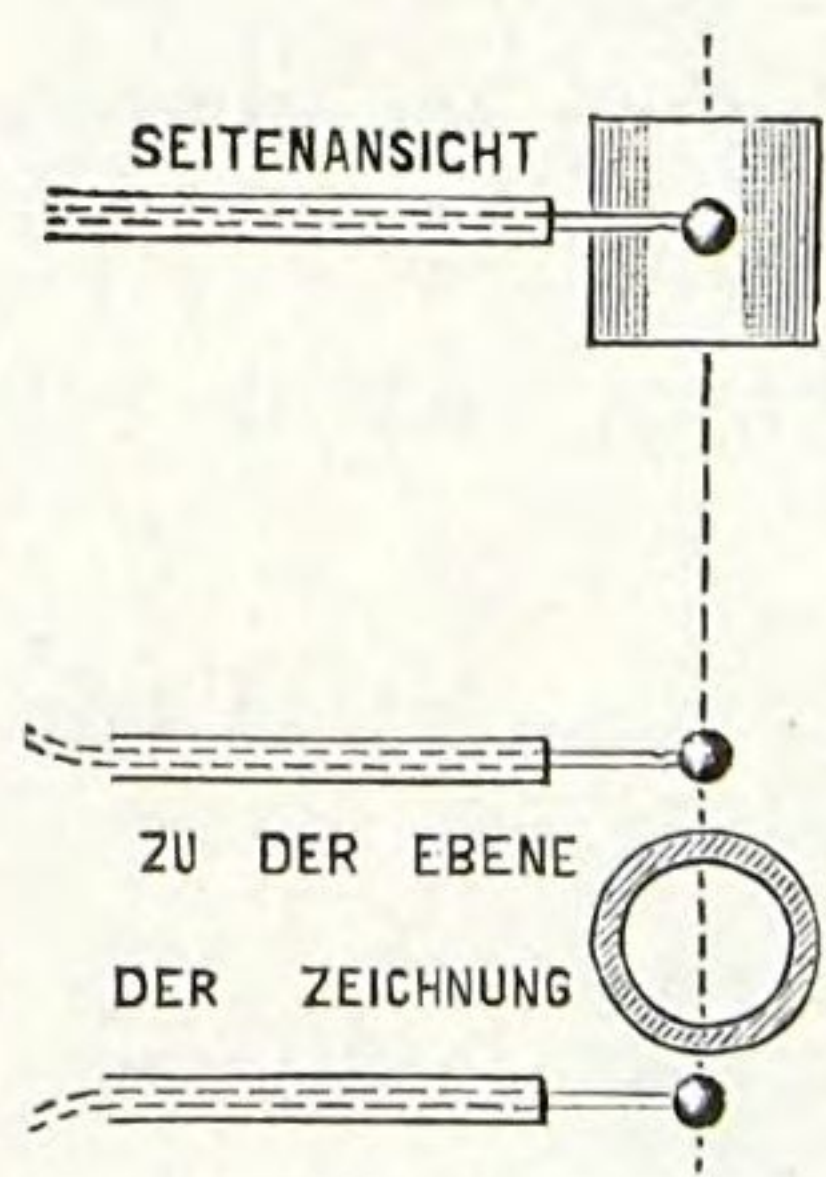


Fig. 116.

ist einfach eine mit Eisenfeilspähnen lose gefüllte Röhre, welche mit dem Galvanometer in den Stromkreis eines Elementes eingeschaltet ist; auch er ist mit einer Metallröhre umschlossen, um ihn vor falscher Strahlung zu schützen. Setze ich den Wellenerreger und Wellenempfänger einander genau gegenüber, so reagirt der Empfänger so oft, als ein Funken im Oscillator entsteht. Nach jeder solchen durch den Ausschlag am Galvanometer angezeigten Reaction brauche ich den Resonator nur leicht mit dem Finger zu

klopfen, damit er wieder wirkungsfähig wird und der Galvanometer-
spiegel in seine Ruhelage zurückkehrt. Bei einer neuen ankommenden Welle wird der Resonator wieder erregt und von Neuem tritt eine Ablenkung am Galvanometer auf.

Stromkreis ein Galvanometer eingeschaltet ist. Er ist montirt auf einem beweglichen Arm eines optischen Kreises, sodass man die optischen Fähigkeiten des elektrischen Strahlenbüschels studiren kann. *M* ist ein Planspiegel, *N* ein Hohlspiegel zum Studium der Reflexion, *P* ein Prisma aus Ebonit, *T* ein besonderer Apparat, um die totale Reflexion studiren zu können; er besteht aus zwei Halbcylindern von Ebonit, zwischen denen sich eine Flüssigkeit befindet. *H* ist ein Halter, in welchem man die zu untersuchenden Mineralien befestigt. Professor Bose fand, dass viele krystallinische und faserige Mineralien, wie z. B. Asbest, die elektrischen Wellen polarisiren. Selbst ein gewöhnliches Buch besitzt in Bezug auf die elektrischen Wellen eine polarisirende Structur; Wellen, welche parallel zu den Blättern schwingen, werden stärker absorbirt als jene, welche in einer Richtung senkrecht dazu schwingen.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Es werde erwähnt, dass nach dem Vorbilde von Righi der russische Physiker Lebedew elektrische Wellen von nur 6 mm Grösse beobachtet und solche von 3 mm auf rechnerischem Wege nachgewiesen hat.

Jetzt drehe ich den Empfänger zur Seite, sodass keine Welle vom Erreger direct zum Empfänger gelangt. Funken auf Funken entladen sich im Oscillator, aber der Resonator reagirt nicht. Benutze ich jedoch einen Metallschirm als Spiegel und spiegele die Wellen zum Erreger oder nehme ein Prisma aus Paraffin und lasse die Wellen durch Brechung dorthin gelangen, sogleich antwortet der Empfänger und bestätigt uns, dass die Strahlen in Folge Spiegelung, beziehentlich in Folge von Brechung „um die Ecke“ gegangen sind.

Wenn somit bewiesen ist, dass die elektrischen Wellen trotz ihrer Unsichtbarkeit genau ebenso wie die sichtbaren Wellen des gewöhnlichen Lichtes reflectirt, gebrochen, polarisirt und absorbirt werden, dürfen wir sie dann nicht auch als ein- und dieselbe Erscheinung auffassen? Mit Ausnahme der Sichtbarkeit verhalten sie sich in Bezug auf alle physikalischen Eigenschaften wie die gewöhnlichen Lichtwellen. Wenn dem aber so ist, dürfen wir dann nicht logischer Weise auch den umgekehrten Schluss ziehen, dass die kleinen, von unserem Auge als Licht empfundenen sichtbaren Wellen des Spectrums ebensogut der Scala der elektrischen Wellen angehören? Und in der That ist diese Vermuthung, dass die Lichtwellen nichts weiter als die Ausbreitung einer elektrischen Störung sind, von Professor Clerk Maxwell schon im Jahre 1864 ausgesprochen worden; seine grossartige Speculation hat sich also vollkommen bewahrheitet. Indem Maxwell seine Ideen auf den Untersuchungen von Faraday, der zuerst das interessante Gebiet der Elektro-Optik bearbeitete, aufbaute, leitete er prophetisch die Eigenschaften der elektrischen Wellen ab. Seine Schlüsse sind niedergelegt in der berühmten Abhandlung, in welcher er die nach ihm benannte elektromagnetische Lichttheorie entwickelt, derzufolge das Licht aus elektrischen Schwingungen besteht, die sich im freien Raum mit der Geschwindigkeit des Lichtes fortpflanzen. Die grossartige Entdeckung von Hertz, durch welche die Existenz der elektrischen Wellen im freien Raume und ihre optischen Eigenschaften experimentell dargethan wurden, rechtfertigte Maxwells Prophezeiung glänzend.

Sechste Vorlesung.

Röntgenstrahlen.

Röntgens Entdeckung. Erzeugung von Licht in luftleer gemachten Röhren durch elektrische Entladung. Wie man die Luft aus einer Röhre pumpt. Die Erscheinungen in einer Geisslerschen Röhre. Die Quecksilber-Luftpumpe. Hittorf-Crookesche Röhren. Eigenthümlichkeit des Kathodenlichtes. Ablenkung der Kathodenstrahlen durch den Magneten. Luminescenz- und mechanische Effecte. Lenards Untersuchung über die Kathodenstrahlen in der Luft. Röntgens Untersuchungen. Die Entdeckung der X-Strahlen durch ihre Luminescenzwirkungen. Schatten auf luminescirenden Schirmen. Durchlässigkeit von Aluminium. Durchlässigkeit von dichteren Metallen. Durchlässigkeit von Fleisch und Leder. Undurchsichtigkeit von Knochen. Abwesenheit von Reflexion, Brechung und Polarisation. Die Eigenschaft der Röntgenstrahlen elektrisirte Körper zu entladen. Verbesserung der Röntgenröhren. Speculation über die Natur der Röntgenstrahlen.
Das Sehen des Unsichtbaren.

Wegen der vielen falschen Berichte über die Entstehung der Röntgenschen Entdeckung namentlich in photographischen Zeitschriften erscheint es mir beim Beginn der Vorlesung über die Röntgenschen X-Strahlen nothwendig, etwas ausführlicher auf die Geschichte der Entdeckung einzugehen. Ich gebe die von Herrn Professor Röntgen selbst herrührende Darstellung.

In einem Interview¹⁾ wurde Herr Professor Röntgen in seinem Laboratorium zu Würzburg um Mittheilung der Geschichte seiner Entdeckung gebeten. „Es giebt keine Geschichte“ antwortete Röntgen. „Ich interessirte mich schon seit langer Zeit für die Kathodenstrahlen, wie sie von Hertz und speciell von Lenard in einer luftleeren Röhre studirt worden waren. Ich hatte die Untersuchung dieser und anderer Physiker mit grossem Interesse verfolgt und mir vorgenommen, sobald als ich Zeit hätte, einige selbstständige Versuche in dieser Beziehung anzustellen. Diese Zeit fand ich Ende October 1895. Ich war noch nicht lange bei der Arbeit, als ich etwas Neues beobachtete.“

„Welches Datum war es?“

„Der 8. November.“

„Und welches war die Entdeckung?“

1) Siehe H. J. W. Dam in M'Clures Magazine, Bd. VI, S. 413.

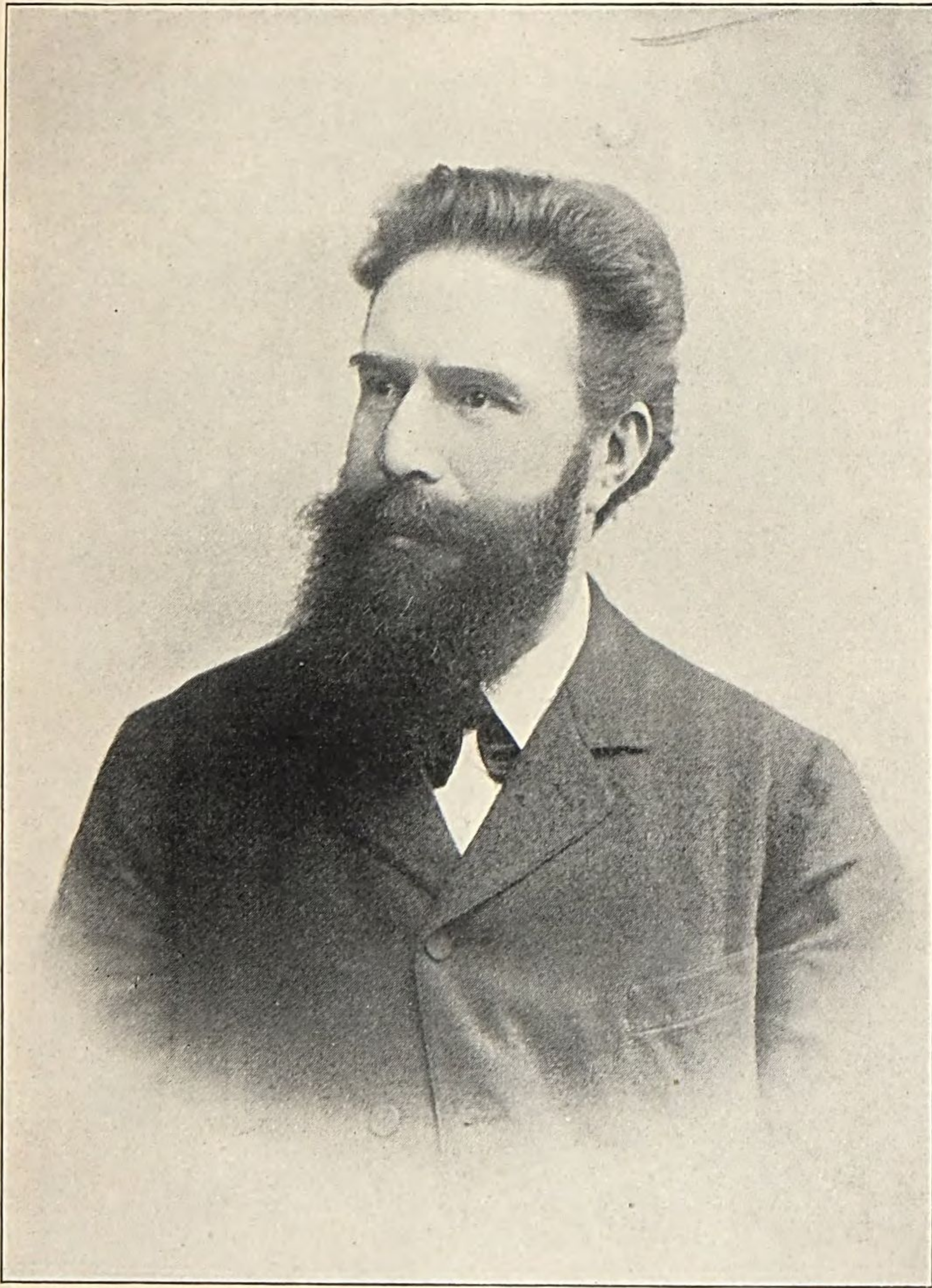


Fig. 126. Professor W. K. Röntgen.

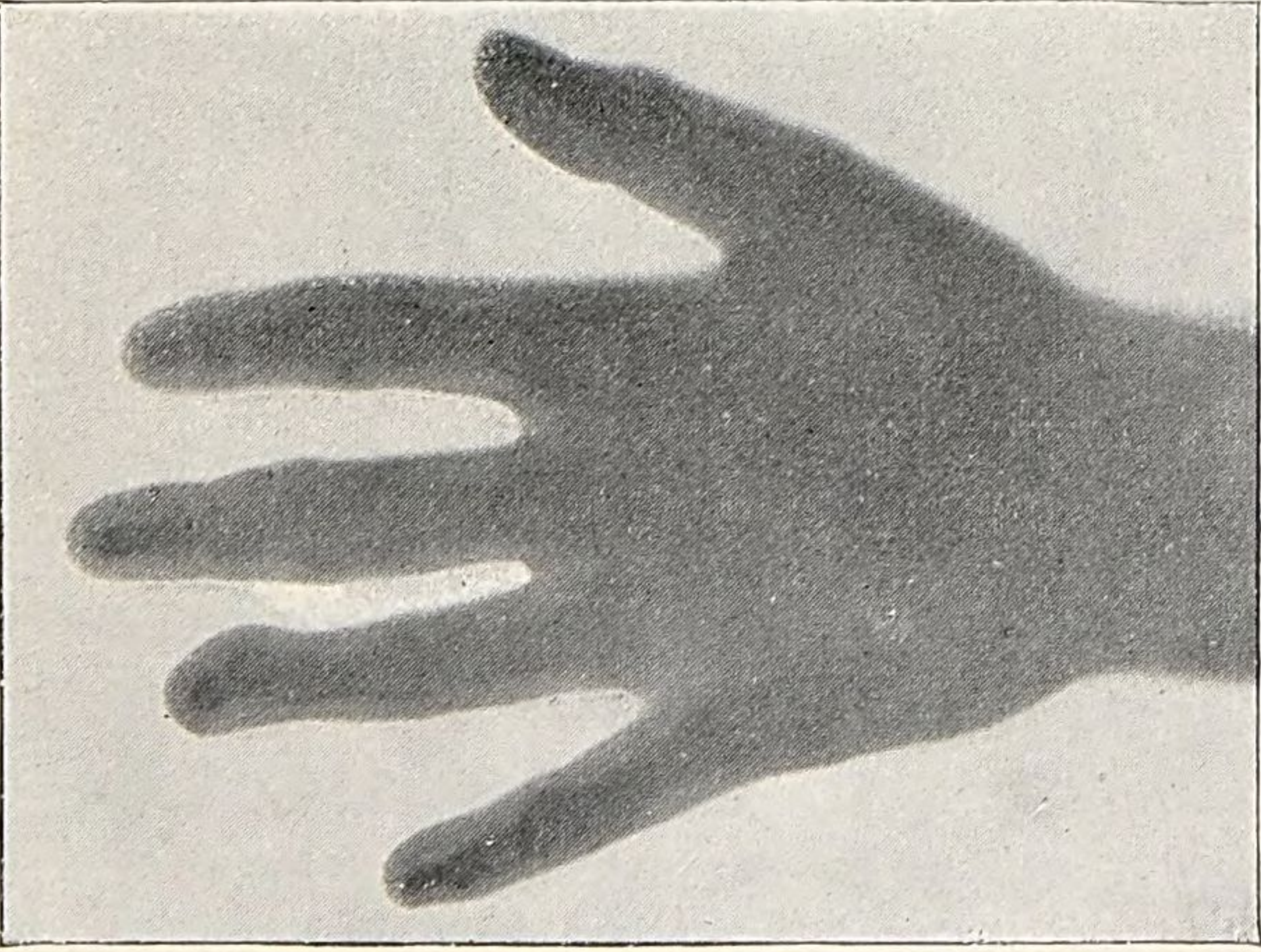


Fig. 133.

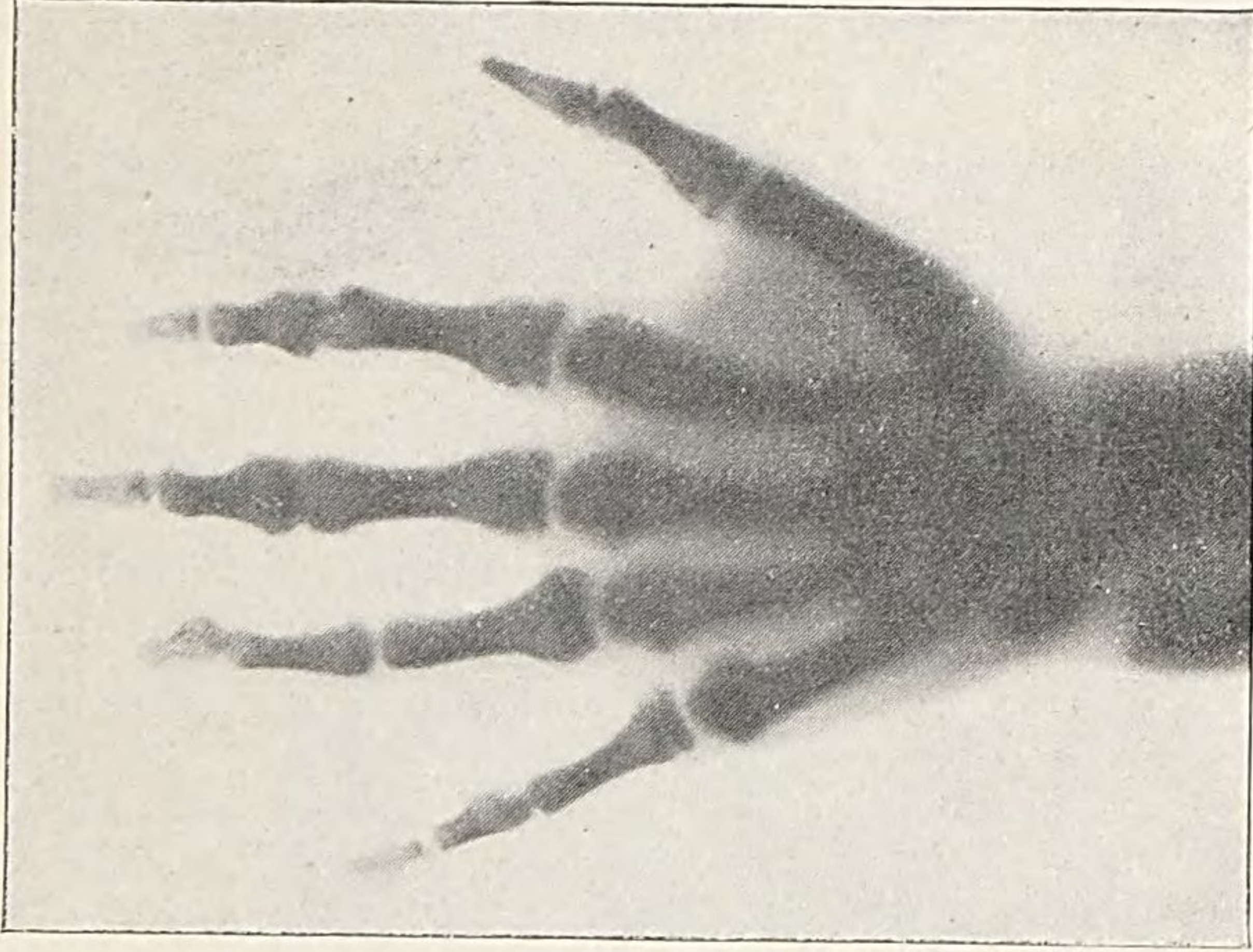


Fig. 134.

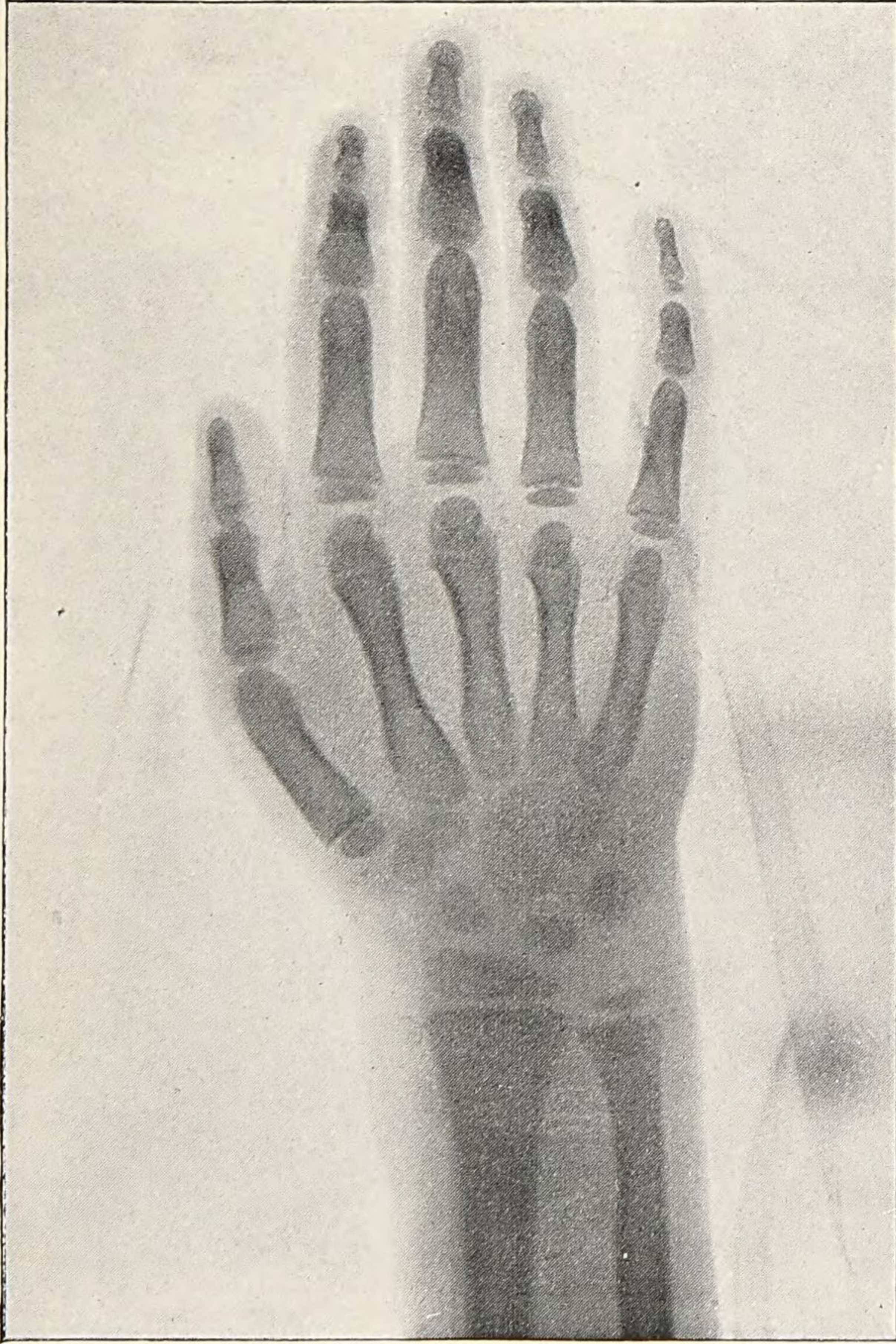


Fig. 135. Hand eines elfjährigen Kindes.

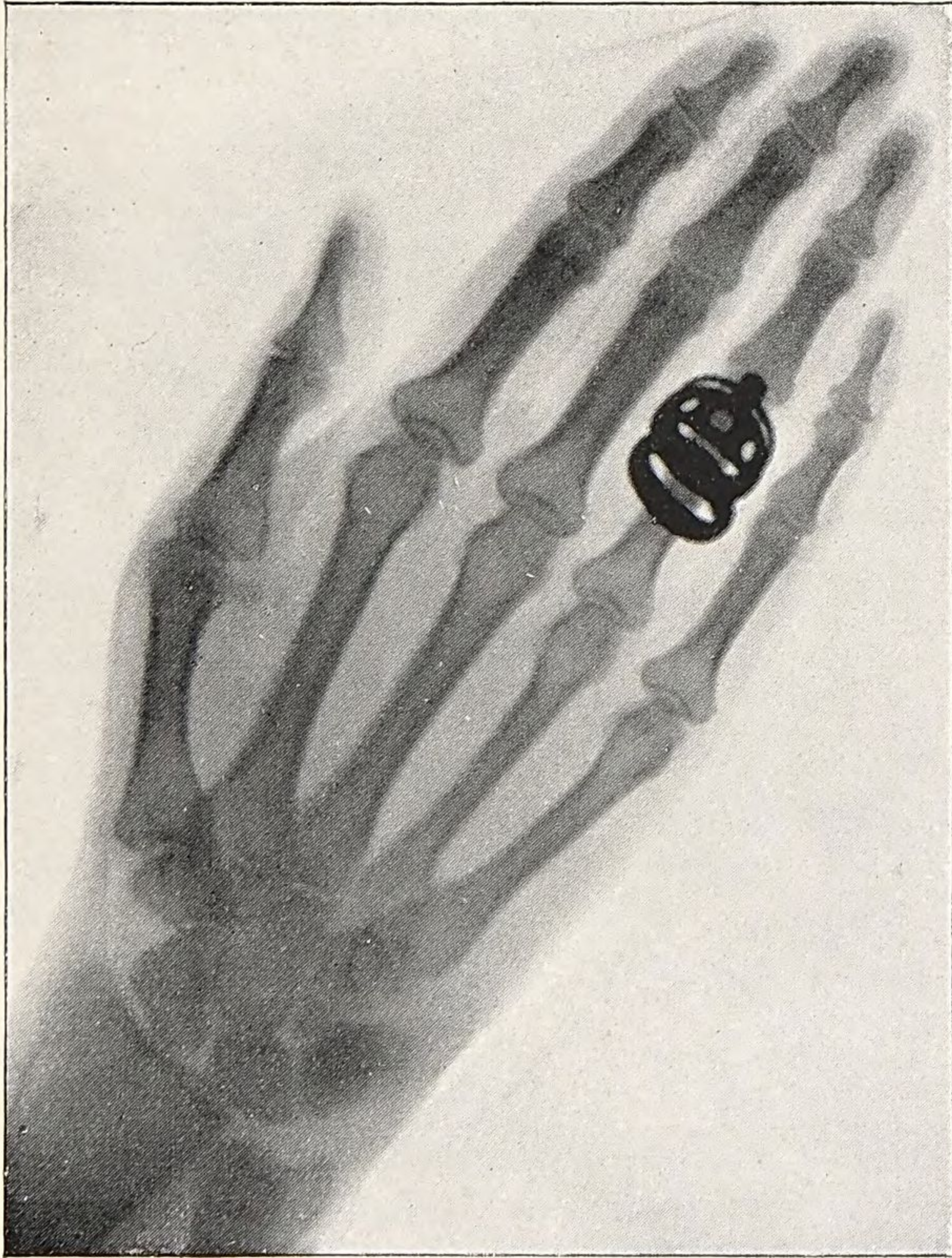
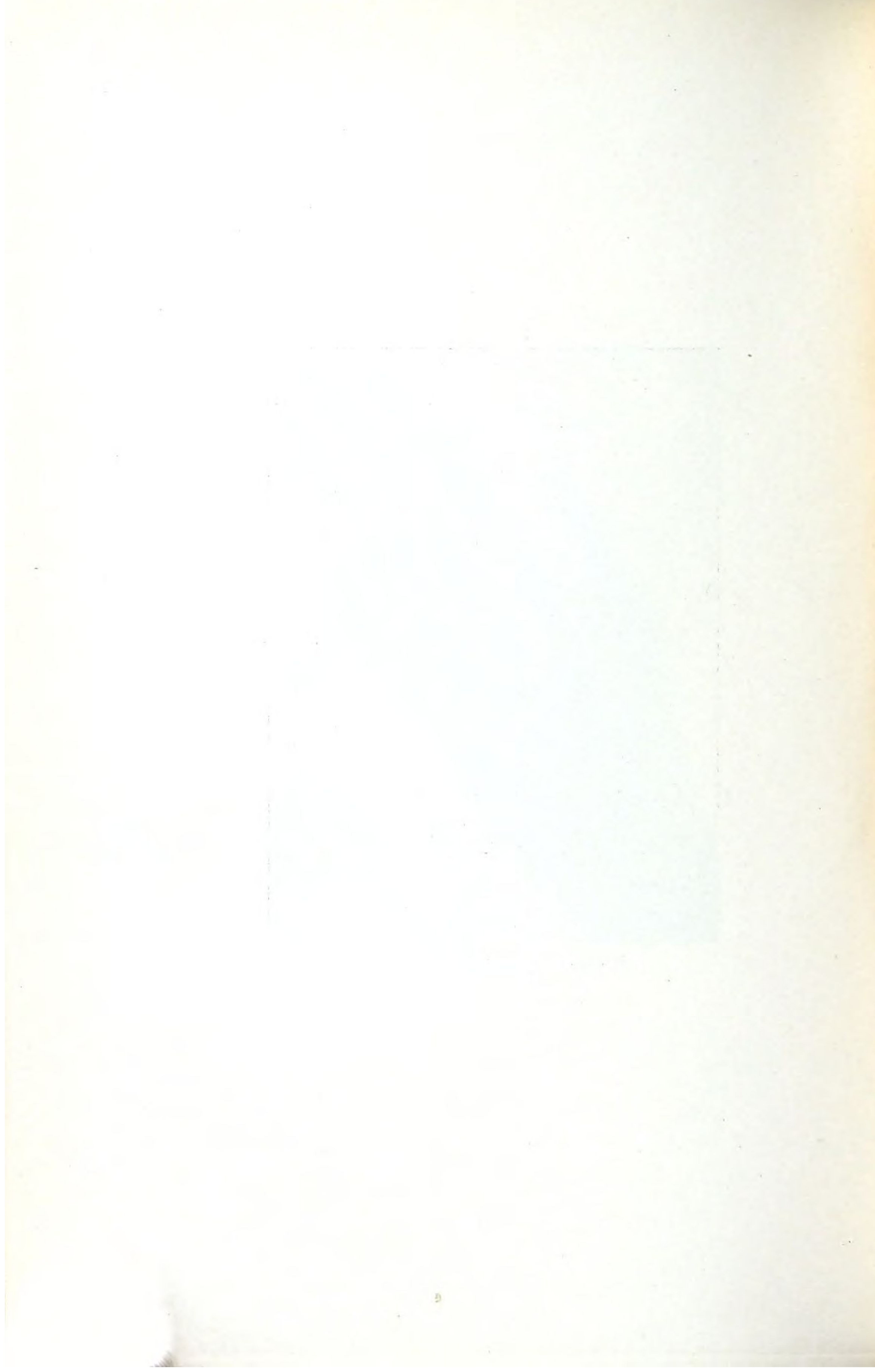
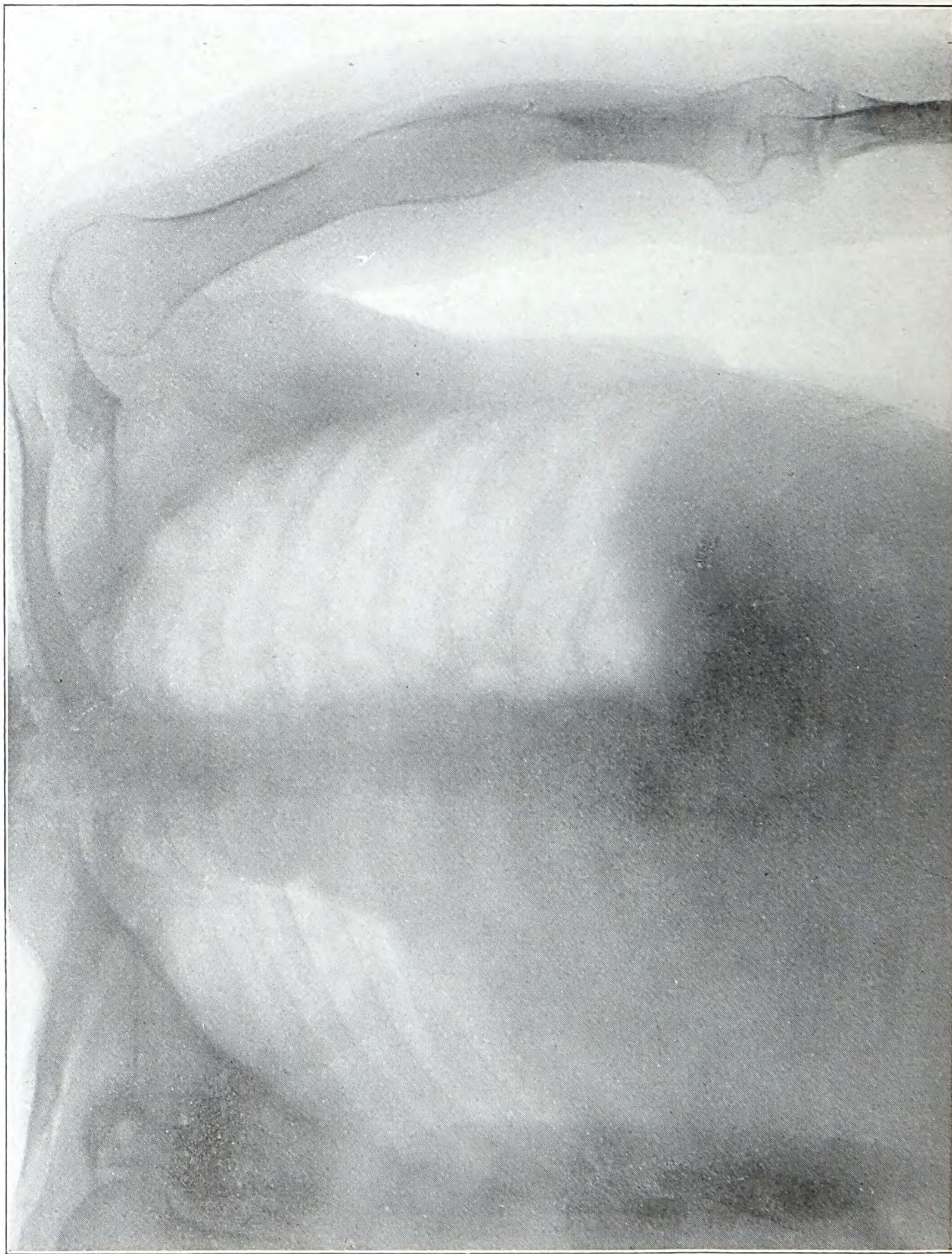
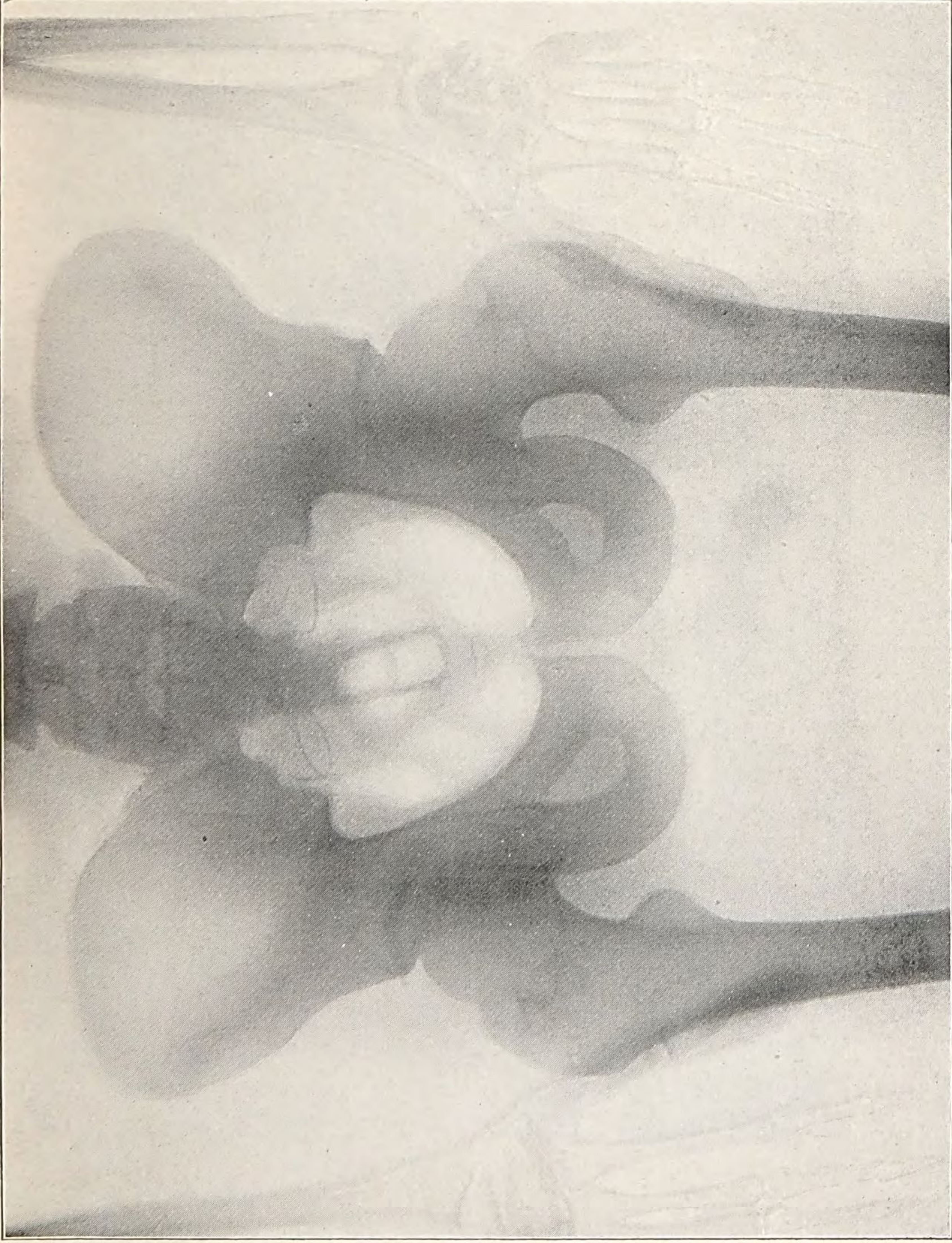


Fig. 136. Hand einer erwachsenen Frau.





Nach einer Aufnahme der Kgl. chirurgischen Universitäts-Klinik in Halle a. S.



Nach einer Aufnahme der Kgl. chirurgischen Universitäts - Klinik in Halle a. S.



Fig. 137. Hand von Lord Kelvin.



Fig. 138. Hand von Sir Richard Webster.

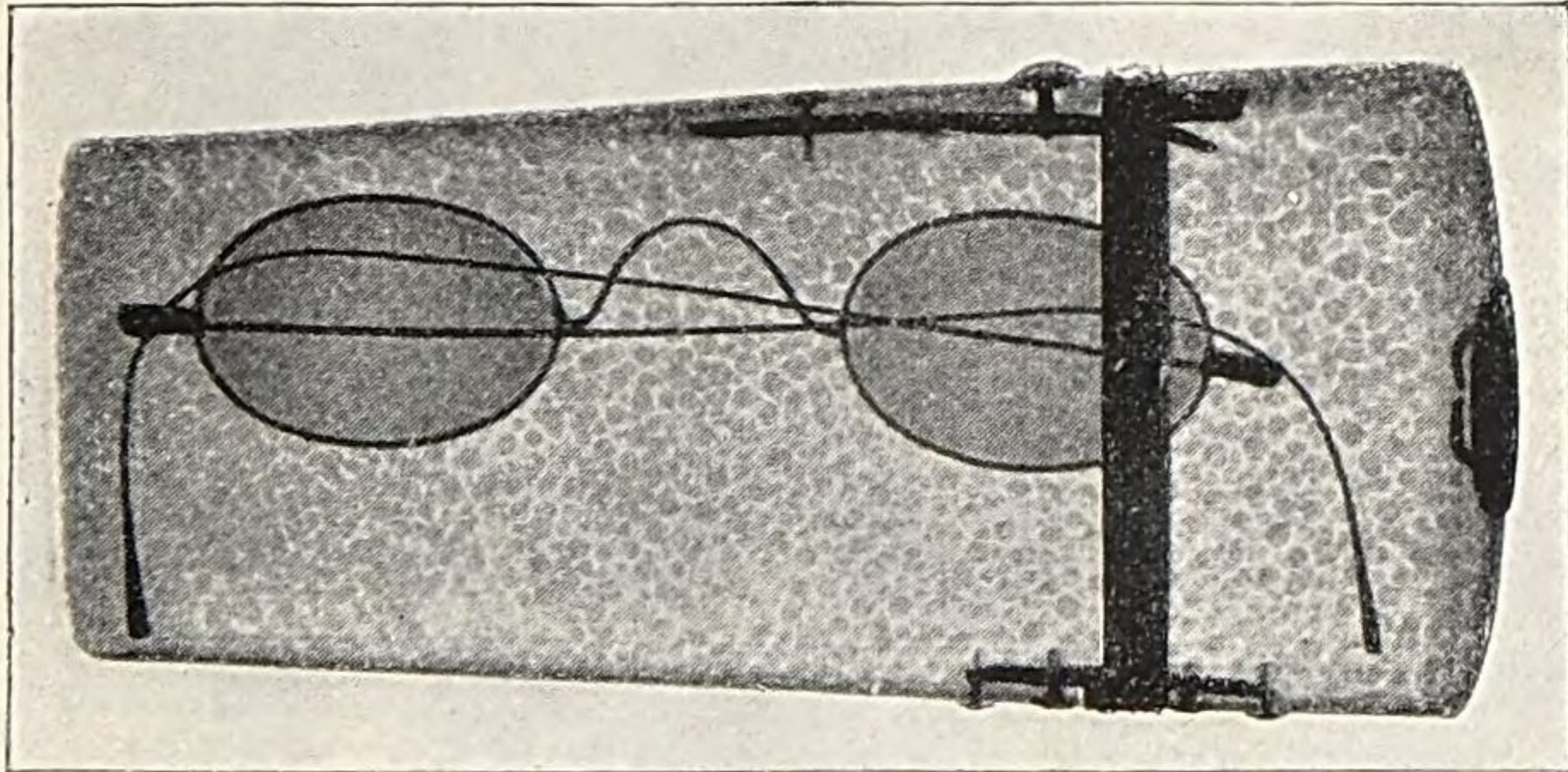


Fig. 139.

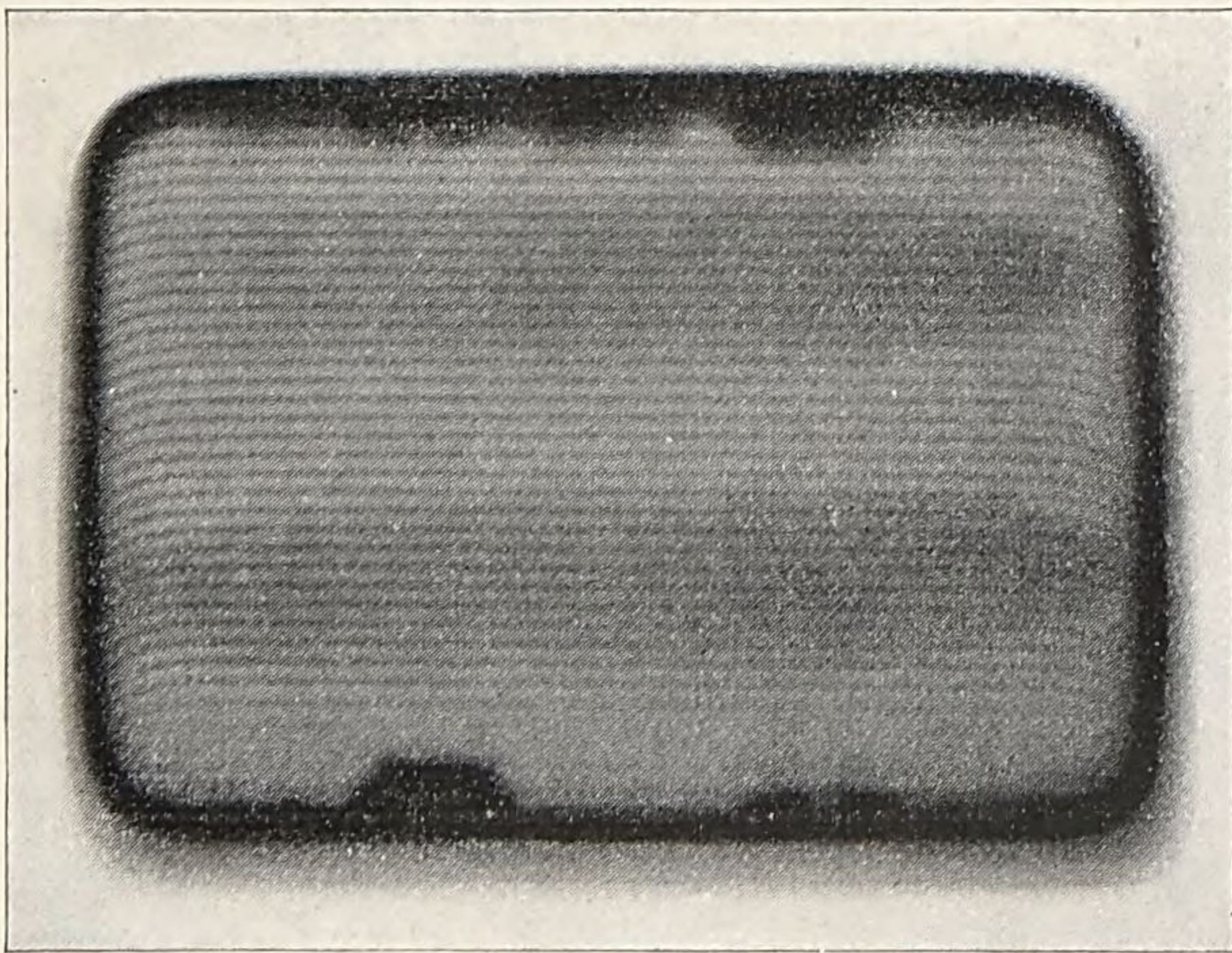


Fig. 140.



Arm eines neunjährigen Mädchens.

Photographie mit Röntgenstrahlen von der k. k. Lehr- und Versuchsanstalt für Photographie in Wien.

„Ich arbeitete mit einer Hittorf-Crookeschen Röhre, welche ringsum in schwarzes Papier eingehüllt war. Ein Stück Bariumplatincyänürpapier lag daneben auf dem Tisch. Ich hatte einen Strom durch die Röhre geschickt und bemerkte quer auf dem Papier eine eigenthümliche schwarze Linie.“¹⁾

„Was war das?“

„Die Wirkung war derart, dass sie den damaligen Vorstellungen gemäss nur von einer Lichtstrahlung herrühren konnte. Es war aber ganz ausgeschlossen, dass von der Röhre Licht kam, weil das dieselbe bedeckende Papier absolut kein Licht hindurchliess, selbst nicht das einer elektrischen Bogenlampe.“

„Was dachten Sie nun da?“

„Ich dachte nicht, sondern ich untersuchte. Ich vermuthete, dass die Wirkung von der Röhre herkommen müsse und prüfte nach dieser Richtung hin genauer. Bald war jeder Zweifel ausgeschlossen: Es kamen „Strahlen“ von der Röhre, welche eine luminescirende Wirkung auf den Schirm ausübten. Ich wiederholte den Versuch mit Erfolg in immer grösseren und grösseren Entfernungen, fast bis zu 2 Metern. Anfangs hielt ich es für eine neue Art von Licht. Sicher aber war es etwas Neues, noch Unbekanntes.“

„Ist es Licht?“

„Nein, denn es kann weder reflectirt, noch gebrochen werden.“

„Ist es Elektrizität?“

„Nicht in der bekannten Form.“

„Was ist es dann?“

1) Anmerkung des Uebersetzers: Wenn das hier mitgetheilte Interview, abgesehen vom abrupten Styl, im Grossen und Ganzen auch richtig ist, so möchte ich es doch nicht unterlassen, gerade bei diesem Passus einige Berichtigungen anzufügen. Zunächst ging, so viel mir bekannt ist, Röntgen von der ihm auffallenden Erscheinung aus, dass die Lenardstrahlen nur auf wenige Centimeter Entfernung eine sichtbare Fluoreszenzwirkung äusserten, während sie eine entelektrisirende elektrische Wirkung noch auf eine grosse Distanz hin ausübten.

Was die Umhüllung der Röhre in Papier betrifft, so erheischte das Lenardsche Fenster einen Schutz gegen die elektrostatische Ladung der Röhre, zu welchem Zwecke die letztere wohl schon eo ipso zum grössten Theile mit einem undurchsichtigen Gehäuse (mit Stanniol überzogene Pappe?) umgeben war.

Der Bariumplatincyänürschirm lag aber auf dem Tische, weil Röntgen sehen wollte, ob dasselbe nicht wirksamer wäre, als die von Lenard benutzte fluorescirende Substanz (Pentadecylparatolyketone). Was den Schatten auf dem Schirme betrifft, so ist derselbe sehr nebensächlich, während das Aufleuchten des Schirmes, trotzdem er sich im „Schatten“ befand, die Aufmerksamkeit Röntgens und in Folge weiterer scharfsinniger Versuche die Entdeckung der X-Strahlen veranlasste.

„Ich weiss es nicht. Nachdem ich die Existenz einer neuen Art von Strahlen nachgewiesen hatte, ging ich daran, ihre Eigenschaften zu untersuchen. Es zeigte sich aus den Versuchen bald, dass die Strahlen ein ungewöhnliches Durchdringungsvermögen besitzen, und zwar von einer Kraft, die bis jetzt an Strahlen unbekannt ist. Sie durchdringen Papier, Holz und Tuch mit Leichtigkeit und innerhalb gewisser Grenzen spielt die Dicke der Substanz überhaupt keine Rolle. Die Strahlen gehen durch alle untersuchten Metalle hindurch, und zwar mit einer Leichtigkeit, die im umgekehrten Verhältniss zur Dichtigkeit des Metalls zu stehen scheint. Diese Erscheinungen sind alle ausführlich in meiner Abhandlung besprochen, welche ich der Würzburger physikalisch-medicinischen Gesellschaft¹⁾ vorgelegt habe; dort finden Sie auch alle Resultate angegeben.“

Dieses war Röntgens eigener Bericht, schlicht wie jene berühmte gewordene Abhandlung der Würzburger Gesellschaft, in welcher Röntgen in einfachen und maassvollen Worten seine Entdeckung beschreibt und zum ersten Mal der wissenschaftlichen Welt mittheilt.

Bemerken Sie wohl, dass im Verlaufe des mitgetheilten Gesprächs nicht ein Wort von „Photographie“ die Rede ist; die Photographie spielt gar keine Rolle bei der Entdeckung. Weder ist eine photographische Platte noch lichtempfindliches Papier benutzt worden. Vielmehr wurde die Entdeckung mit Hülfe eines fluorescirenden Schirmes gemacht, wie Sie ihn in meiner vierten Vorlesung kennen gelernt haben, als wir uns mit dem ultravioletten Licht beschäftigten.

Bei dieser Gelegenheit zeigte ich Ihnen einen mit Bariumplatin-cyanür bedeckten Pappschild, welchen ich schon seit 1876 besitze. Setzte ich ihn den unsichtbaren ultravioletten Strahlen aus, so fing er im Dunklen an zu leuchten. Ein gleicher Schild — ein mit luminescirender Substanz bedecktes Stück Papier — war es, den Röntgen bei seinen Untersuchungen benutzte. Da aber Lumineszenzschilder nicht zufällig in einem Laboratorium herumliegen, so folgt mit Wahrscheinlichkeit, dass das Vorhandensein eines solchen auf Röntgens Experimentirtisch nicht dem Zufall zu verdanken war.²⁾

1) „Ueber eine neue Art von Strahlen“ (vorläufige Mittheilung) von Dr. Wilhelm Konrad Röntgen. Sitzungsberichte der Würzburger physik.-medicin. Gesellschaft 1895.

2) Es ist interessant zu erwähnen, dass Lenard seine Untersuchung im Jahre 1894 ebenfalls mit Hilfe eines Lumineszenzschildes ausführte, bei welchem das Papier mit Pentadecylparatolyketone imprägnirt war. (Vergl. hierzu die vom Uebersetzer auf der vorigen Seite gemachte Anmerkung. Der Uebersetzer.)

Zum besseren Verständniss der Natur der Röntgenschen Entdeckung wollen wir die Beobachtungen mit den besten uns jetzt zur Verfügung stehenden Hilfsmitteln wiederholen.

Vor Ihnen steht eine Hittorf-Crookes'sche Röhre, welche in Wirksamkeit versetzt wird, sobald ich durch sie die elektrischen Entladungen eines Ruhmkorff'schen Inductoriums schicke. Sie leuchtet mit sichtbarem Licht und das Glas fluorescirt in herrlicher goldgelber Farbe. Um alles sichtbare Licht abzublenzen, stülpe ich über die Röhre dieses Gehäuse aus schwarzem Papier, welches nicht nur sämtliche sichtbaren, sondern auch alle ultrarothern und ultravioletten Strahlen abschneidet. Gerade unter der Röhre liegt auf dem Tisch ein mit Bariumplatincyannür bedecktes Blatt Papier — also ein Luminescenz- oder Fluorescenzschirm. Sobald ich nun durch die Hittorf-Crookes'sche Röhre die Entladung des Inductoriums schicke, leuchtet der im Dunkeln befindliche luminescirende Schirm auf, während sich quer über ihn — wie alle Nähersitzenden deutlich bemerken werden — eine dunkle Linie lagert, welche nichts weiter als der Schatten eines kleinen Trägers ist, der sich zwischen der Röhre und dem Schirm befindet. Irgend etwas ist sicherlich Schuld daran, dass der Luminescenzschirm aufleuchtet. Kann aber ausser der Röhre irgend etwas anderes die Ursache sein? Prüfen wir diese Frage, indem wir verschiedene Gegenstände zwischen die Röhre und den Schirm bringen und beobachten, ob sie einen Schatten werfen. Das mir zunächst liegende Object ist eine Holzrolle, über welche ein elektrischer Leitungsdraht gewickelt ist. Sobald ich diese Rolle dazwischen lege, entsteht ein Schatten auf dem Papier. Bei näherer Beobachtung bemerken wir auch, dass merkwürdigerweise der Draht einen deutlichen Schatten erzeugt, während das Holz einen kaum merklichen Schatten hervorbringt. Ich halte den Schirm näher an die Röhre, damit Sie den Schatten besser erkennen können. In der That geht also von der Röhre eine Art von Strahlen aus, die den Schirm da zum Leuchten bringen, wo keine Objecte im Wege stehen und die dazwischen liegenden undurchsichtigen Objecte merklich durchdringen, sodass je nach der Art des Körpers von ihm auf dem Schirm ein mehr oder weniger deutlicher Schatten erzeugt wird. Dabei geht dieses unsichtbare Licht — wenn es Licht ist — von der **verdunkelten** Röhre aus. Ist es denn aber Licht? Nein, denn Licht, wie wir es kennen, vermag nicht den schwarzen Pappschirm zu durchdringen. Werden aber gleichwohl diese neuen Strahlen vermittelt durch die Wellen des Aethers, dann sind es sicherlich

solche von ganz neuer und durchdringender Art. Während ich den Schirm in der Hand halte, entferne ich ihn mehr und mehr. Hier in 2 Meter Entfernung leuchtet der Schirm immer noch, wenn auch nicht mehr so intensiv, wie in der Nähe, und dies bleibt der Fall, gleichviel ob seine Vorder- oder Rückseite gegen die Glasröhre gekehrt ist. Die unbekannten X-Strahlen, welche schon das schwarze Papier durchlaufen haben, mit dem die Röhre eingehüllt ist, vermögen auch den Fluoreszenzschirm von hinten zu durchdringen und die chemisch präparierte Vorderseite zum Leuchten zu bringen.

Wir wollen Röntgen auf seinem Wege weiter folgen und die Fähigkeit der Strahlen alle Körper zu durchdringen, näher kennen lernen. Ich bringe zwischen Schirm und Röhre einen Holzblock, auf welchem mit Hülfe von Nägeln eine Scheere befestigt ist. Sie sehen auf dem Schirm den deutlichen Schatten der Scheere und einen sehr schwachen Schatten des Holzes; die X-Strahlen passiren also Holz wesentlich leichter als Stahl. Papier, Pappe und Kleider werden von ihnen leicht durchdrungen. Im allgemeinen sind die Metalle undurchsichtiger als alle organischen Substanzen; dabei weichen sie in Bezug auf ihre Durchsichtigkeit ihrerseits wieder von einander ab. Sind dünne Metallbleche jeder Art mehr oder weniger transparent, so zeigen sie, in dicken Schichten untersucht, verschiedene Grade der Durchsichtigkeit. Ein Goldstück, eine Silbermark, eine Kupfermünze sind undurchsichtig; dagegen sind die leichteren Metalle wie Zinn, Magnesium und Aluminium, vor allem das Letztere, ziemlich durchlässig. Hier ist meine Lederbörse, versehen mit einem metallenen Bügel. Ich brauche sie nur zwischen die Röhre und den Schirm zu halten, um deren Inhalt kennen zu lernen — zwei Münzen und ein Ring — da ja Leder die X-Strahlen fast ungeschwächt durchlässt. Ein Aluminiumblech von der Dicke eines $\frac{1}{10}$ Millimeter, welches für die bisher bekannten Strahlen absolut undurchdringlich ist, schwächt diese neue Art von Strahlen fast gar nicht. Andererseits ist Blei wieder so gut wie undurchlässig. Nach Röntgen ist die Undurchlässigkeit nahe proportional der Dichte der Körper. Man hat seitdem gefunden, dass die Durchlässigkeit vom Atomgewicht abhängt und dass das Metall mit dem grössten Atomgewichte die X-Strahlen am wenigsten hindurchlässt. Uran, dessen Atomgewicht ungefähr 240 beträgt, ist am undurchsichtigsten, während Lithium, dessen Atomgewicht nur 7 ist und welches leicht auf dem Wasser schwimmt, äusserst durchsichtig ist. Thatsächlich habe ich niemals einen guten Schatten von Lithium erhalten können. Diese Beziehung

gilt nicht nur für die Metalle, sondern auch für deren Verbindungen. So ist Lithiumchlorid durchscheinender als Zinkchlorid oder als Silberchlorid.

Hatte Röntgen auf diese Weise gefunden, dass die dichteren Stoffe auch die undurchsichtigeren sind, und dass, während Glas und Stein fast alle Strahlen abschneiden, Stoffe wie Gelatine und Leder im Vergleich hierzu fast durchsichtig sind, so schloss er weiter, dass auch Knochen viel undurchsichtiger sein müsse als Fleisch. Und in der That ist dem so. Lege ich meine Hand zwischen die Röhre und den Schirm, so sehen Sie einen hellen Schatten der Fleischtheile und einen dunklen Schatten der Knochen. Im Dunklen würden wir auf dem leuchtenden Schirm nicht nur den Schatten der Handknochen, sondern auch denjenigen der Handgelenke und der Armknochen erkennen. Somit kann man also wirklich vom „Sehen des Unsichtbaren“ reden.

Hier nahm die Untersuchung einen andern Gang. Bisher war von Photographie noch keine Rede. Nachdem aber einmal die durchdringende Kraft der neuen Strahlen entdeckt und die Schatten auf dem luminescirenden Schirm gesehen worden waren, bedeutete es nur einen natürlichen Schritt weiter, diesen Schatten photographisch festzuhalten. Denn man wusste schon, dass die Fluorescenz und Phosphorescenz hervorrufenden ultravioletten Strahlen auch gerade jene Strahlen sind, welche am meisten chemisch und photographisch wirksam sind. Demnach war zu erwarten, dass diese neuen Strahlen ebenfalls eine photographische Platte erregen würden. Diese Vermuthung bestätigte sich. Röntgen erhielt eine Photographie sowohl von einem Satz metallener Gewichte, welche in einem hölzernen Kasten verschlossen waren, als auch von der Nadel und dem Zifferblatt eines Compasses durch ein messingenes Gehäuse hindurch. Hierdurch ermuthigt befestigte er die Röhre unter der Holzplatte eines Tisches und montirte darüber die photographische Platte mit ihrer empfindlichen Seite nach unten, während er zwischen die Platte und den Tisch seine Hand hielt. Die von der Röhre durch den Tisch gegangenen Strahlen erzeugten auf der Platte das viel bewunderte Schattenbild der Hand und bildeten dasselbe in allen seinen Einzelheiten ab. So gelang es Röntgen zum ersten Mal die Knochen einer lebenden Hand zu photographiren. Es war die „Photographie des Unsichtbaren“ gelöst! Aber merken Sie wohl, selbst hier haben wir es nicht mit einer neuen Art der Photographie zu thun. Die hier zur Geltung kommende Photographie ist

die längst bekannte Photographie mittels Trockenplatten; diese werden erst belichtet und hierauf im Dunkelmzimmer entwickelt.

Wiewohl dem Gang der Vorlesung nach noch nicht hierher gehörig, will ich doch schon jetzt einige Aufnahmen machen, damit sie in der Zwischenzeit der langwierigen Entwicklung im Dunkelmzimmer unterworfen und nach ihrer Entwicklung auf dem Schirm projicirt werden können.¹⁾

Lassen Sie uns nun zur Geschichte der Entdeckung zurückkehren und zum näheren Verständniss derselben einen Blick auf die Vergangenheit werfen. Vor zwei Jahrhunderten etwa, als nach Erfindung der Elektrisirmaschine und der vervollkommeneten Luftpumpe die ersten Versuche über das merkwürdige Licht angestellt wurden, welches auftritt, wenn der elektrische Funken einen nahe luftleeren Raum durchheilt, war Europa über die „Quecksilber-Phosphoreszenz“

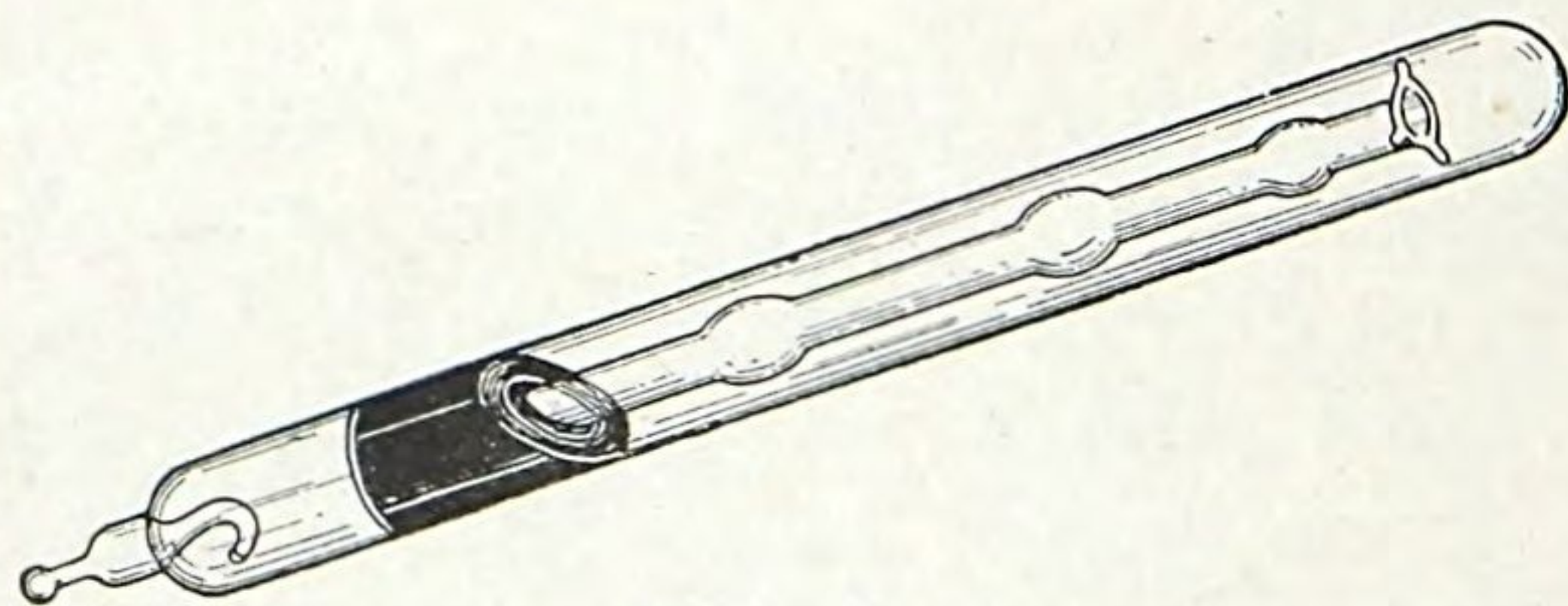


Fig. 117.

vielleicht ebenso sehr erregt, wie es die heutige Welt über die Röntgenstrahlen ist. Zur Herstellung dieses Quecksilber-Phosphoreszenzlichtes bediene ich mich der kleinen Glasröhre,

die ich in meiner Hand halte (Fig. 117) und in der sich einige Tropfen Quecksilber befinden, während aus ihr die Luft mittels einer Luftpumpe bis auf einen geringen Rest ausgepumpt worden ist (partielles Vacuum). Ich brauche die Röhre nur zu schütteln, so blitzt sie mit einem grünlichen Licht hell auf. Die Reibung des Quecksilbers gegen die Wände der Röhre beim Schütteln verursacht elektrische Entladungen, welche sich durch die verdünnte Luft ausgleichen und diese zum Leuchten bringen.

Während ich zu Ihnen gesprochen habe, ist durch eine im Keller befindliche und mittels eines Gasmotors getriebene Luftpumpe eine grosse oval gestaltete Glasröhre ausgepumpt worden; nur vielleicht der 300. Theil der ursprünglichen Luftmenge ist in der Röhre zurückgeblieben. Sende ich durch sie von oben nach unten die Funken eines Inductoriums, so wird die Röhre von einem lieb-

1) Es wurden hier Aufnahmen von der Hand eines Jungen und eines Mädchens gemacht; ausserdem wurden die Schattenbilder verschiedener Edelsteine aufgenommen, unter denen sich ein Burmesischer Rubin, ein falscher Rubin, ein Capdiamant und ein indischer Diamant befanden.

lichen, bleichen carmesinrothen Licht erfüllt, welches nach dem unteren Rohrende zu eine violette Färbung annimmt. Vertausche ich die Zuleitungen, sodass die Entladung von unten nach oben geht, so wandert auch der violett gefärbte Theil an das obere Ende der Röhre. Es ist dies ein Kriterium dafür, an welchem Ende die elektrische Entladung die Röhre verlässt. Die milde Gluth dieser primitiven Vacuum-Röhre ist reich an ultraviolettem Licht, welches, wie Sie wissen, ganz besonders im Stande ist Fluorescenz zu erregen. Halte ich in die Nähe der Röhre meinen Schirm mit Platincyanür, so bemerken Sie die prächtige grüne Fluorescenz. Wohl wird von meiner Hand auf dem Schirm auch ein Schatten entworfen, wenn ich sie in den Strahlengang bringe, aber Sie sehen nichts von den Knochen der Hand. Denn hier entsteht kein Röntgenlicht; die Fluorescenz wird vielmehr durch gewöhnliches ultraviolettes Licht hervorgerufen, welches weder Fleisch noch Papier zu durchdringen vermag. Lasse ich die Luft durch Drehen des Hahnes langsam wieder in die Röhre eindringen, so zieht sich die rosige Gluth zuerst zu einem schmalen Band zusammen, dann zu einer blassen Linie, welche sich schliesslich in einen flackernden Funken auflöst, einem Blitz en miniature vergleichbar. Pumpen wir wieder die Luft aus, so kehrt die frühere Gluth zurück.

Einen anderen schönen Effect erhalten wir mit einer luftleeren Röhre, wenn wir in ihr Inneres ein Stück Uranglas bringen, wie es Cassiot vor 50 Jahren zum ersten Male beschrieben hat. Die Entladung überfluthet das Uranglas mit lieblichen Lichtstrahlen violetter Farbe, während das Glas selbst lebhaft grün fluorescirt. Es sind einige 30 Jahre her, da wurden die Vacuum-Röhren zu einem Handelsartikel und in vielen complicirten und prächtigen Formen besonders von Dr. Geissler in Bonn hergestellt, welcher übrigens der Quecksilber-Luftpumpe eine Gestalt gegeben hatte, mittels deren er ein vollkommeneres Vacuum erzielte.¹⁾ Freilich ist das Vacuum, welches zur Entfaltung der herrlichsten Farben beim Durchgang elektrischer Entladungen genügt, noch immer weit von dem Vacuum entfernt, welches bei den X-Röhren erforderlich ist. Hier ist eine Geisslersche Röhre; sie zeigt wundervolle Effecte, wenn man durch sie die Entladung eines Inductoriums sendet. Seltsame Schichtungen und Streifungen zittern den Windungen der Glasröhre entlang, die

1) Siehe die Monographie des Autors über „die Entwicklung der Quecksilber-Luftpumpe“ publ. im Jahre 1888 durch die Herren E. und F. N. Spon.

ihrerseits in charakteristischem Fluoreszenzlicht leuchten. Natronglas fluorescirt mit goldgrüner Farbe, Bleiglas in schönem Blau, Uranglas dagegen in glänzendem Grün. Der violette Schimmer, welcher an dem einen Ende der Röhre erscheint und die Metallelektrode umgiebt, durch welche der Strom die Röhre verlässt, verdankt sein Entstehen dem Stickstoff in der verdünnten Luft. Jede Gasart giebt ihr besonderes charakteristisches Licht und zeigt bei verschiedenen Graden des Vacuums leuchtende Erscheinungen verschiedener Art.

Ich habe hier eine Reihe von 8 Röhren, alle von derselben einfachen Form (Fig. 118) und von einander nur durch den Grad der Luftleere verschieden. An den Enden jeder Röhre sind Platindrähte eingeschmolzen. Der eine Draht *a* dient als Anode; bei ihr tritt der elektrische Strom ein. Der andere Draht *k* dient als Kathode; an dieser Stelle tritt der Strom aus der Röhre aus. Beide Drähte sind an ihren Enden mit Aluminium versehen, weil dieses Metall vom elektrischen Strom nicht so leicht zerstäubt wird wie

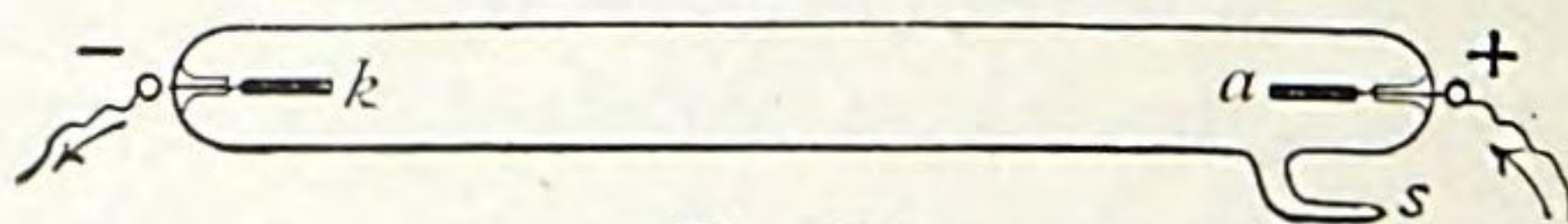


Fig. 118.

Platin. Die kleine Seitenröhre *s*, welche während des Auspumpens die Verbindung der Röhre mit der Quecksilber-Luftpumpe vermittelte, ist nach Herstellung des Vacuums abgeschmolzen worden.

Die erste Röhre ist gefüllt mit Luft unter gewöhnlichem Atmosphärendruck und giebt überhaupt kein Licht. Die Entfernung zwischen Anode und Kathode ist zu gross (etwa 26 cm), als dass ein Funken überspringen könnte. Die zweite Röhre ist so weit ausgepumpt, dass nur noch $\frac{1}{5}$ der ursprünglichen Luftmenge in ihr enthalten ist; durch dieses unvollkommene Vacuum stürzen ab und zu blitzartige blasse Funken. Die dritte Röhre ist bis auf den zwanzigsten Theil ausgepumpt, d. h. aus ihr sind $\frac{19}{20}$ der Luftmenge entfernt. Sie zeigt anstatt der hervorbrechenden Funken eine einzige dünne rothe Linie, welche biegsam ist wie ein leuchtender Draht. In der vierten Röhre beträgt die zurückgebliebene Luft nur noch den vierzigsten oder fünfzigsten Theil. Sie sehen, hier hat sich die rothe Linie zu einem leuchtenden Band erweitert, welches von Pol zu Pol reicht, während an jedem Ende ein violetter Mantel auftritt, der an der Kathode heller ist als an der Anode. Bei der fünften Röhre, in der nur noch der fünfhundertste Theil der Luft enthalten ist, hat sich die von einer zur anderen Seite reichende Lichtsäule in eine

Anzahl transversaler Schichtungen getheilt, welche zittern und tanzen; der violette Mantel rund um die Kathode ist grösser und deutlicher geworden. Er ist von der flackernden rothen Säule durch einen dunklen Raum getrennt und ist selbst wieder von der Kathode durch einen engen dunklen Zwischenraum geschieden. In der sechsten Röhre ist der Grad der Verdünnung bis auf $\frac{1}{1000}$ getrieben. Hier haben die flackernden Schichtungen sowohl ihre Gestalt als auch ihre Farbe geändert; es sind deren weniger vorhanden und diese sind von weisserer Farbe. Das Licht an der Anode ist zusammengeschrumpft zu einem Punkt, während die violette Gluth um die Kathode herum sich erweitert hat und das zugehörige Ende der Röhre ganz ausfüllt. Der dunkle Raum zwischen diesem Licht und der Kathode ist weiter geworden und die Kathode hat um sich einen engeren Mantel von fuchsrother Farbe erzeugt, gleichsam als ob sie zur Rothgluth erhitzt wäre. Auch scheint das Glas am Ende der Kathode die Tendenz zu haben, ein grünes Fluorescenzlicht auszusenden. In der siebenten Röhre ist die Verdünnung noch weiter getrieben; nur der fünfzigtausendste Theil der Luftmenge ist in ihr noch enthalten. Die leuchtende Säule ist verblichen und grauweissen Nebelflecken gewichen. Der dunkle Raum rings um die Kathode hat sich bedeutend erweitert und das Glas der Röhre zeigt eine schöne gelbgrüne Fluorescenz. In der achten Röhre sind nur noch ein oder zwei Milliontel der ursprünglichen Luft enthalten; man findet, dass die Entladung jetzt wieder sehr viel schwieriger durch die Röhre geht. Alle die flackernden Wolken und Schichtungen im zurückgebliebenen Gase sind verschwunden. Die Röhre macht den Eindruck, als ob sie vollständig leer wäre, aber dafür leuchten die Glaswände mit jenem intensiven goldgrünen Fluorescenzlicht, welches besonders schön an den Theilen rings um die Kathode erglänzt. Hätten wir die Verdünnung noch weiter getrieben, so hätte der innere Widerstand so zugenommen, dass die Entladung des Inductoriums unfähig gewesen wäre, den Raum zwischen Anode und Kathode zu überwinden.

Um diese hohen Grade der Verdünnung zu erreichen, muss man sich der Quecksilberluftpumpe bedienen; keine mechanische Luftpumpe ist im Stande auch nur annähernde Luftleere zu erzeugen. Die Sprengelsche Quecksilberluftpumpe, durch Dr. Hermann Sprengel im Jahre 1865 erfunden, ist ein bewundernswerthes Instrument. Dieselbe wurde modificirt und verbessert durch Herrn Crookes im Jahre 1874, dessen Luftpumpe in Fig. 119 (a. f. S.) dargestellt ist. Das

Quecksilber befindet sich in einem Hilfsgefäß, welches beim Heben das Quecksilber durch die Pumpe treibt und beim Senken sich wieder füllt. Dieses Gefäß steht durch einen biegsamen starken Gummischlauch mit der Pumpe in Verbindung, welche ihrerseits aus zusammengeschmolzenen Glasröhren besteht. Vom Pumpenkopf fällt das Quecksilber in Form von Tropfen in eine enge Röhre, die

„Fallröhre“ genannt, wobei jeder Tropfen beim Fallen wie ein Stempel wirkt, die Luft vor sich hertreibt und so langsam den Raum im oberen weiteren Theil der Röhre luftleer macht. Eine Trockenröhre, gefüllt mit Phosphorsäure, um die

Feuchtigkeit zu absorbiren, ist zwischen die Pumpe und die Röhre geschaltet, welche ausgepumpt werden soll. Gewöhnlich wird noch eine Barometerröhre eingeschaltet, um den Grad der Verdünnung erkennen zu können.

Vor Ihnen an der Wand ist eine in Fig. 119 skizzierte Quecksilber-Luftpumpe befestigt, nur sind bei ihr drei Fallröhren statt einer einzigen angebracht, damit sie schneller pumpt. Durch diese „Fallröhren“ tropft das Quecksilber frei herab und saugt hierdurch die Luft aus der luftleer zu machenden Röhre, welche mit der Pumpe durch eine relativ enge Glasröhre luftdicht verbunden worden ist. Sobald die Verdünnung genügend weit vorgeschritten ist, schmilzt man mittels einer leuchtenden Gasflamme die Verbindungsröhre an ihrer engsten Stelle ab.¹⁾

Einer solchen Pumpe bediente sich Crookes im Jahre 1874 und 1875 bei seinen Arbeiten über die „Abstossung durch Strah-

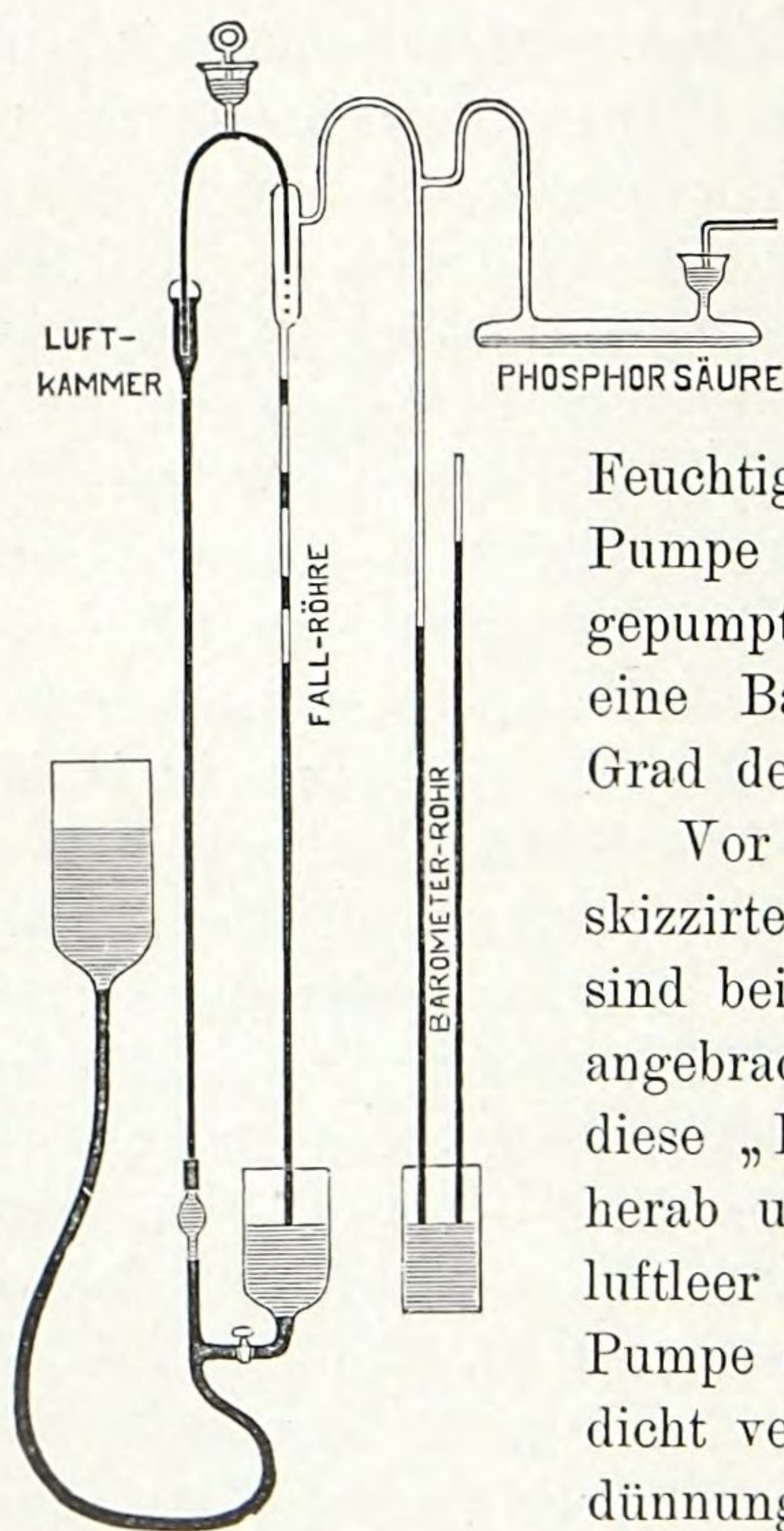


Fig. 119.

1) Anmerkung des Uebersetzers: In Deutschland ist neben der Sprengelschen Quecksilber-Luftpumpe und deren Modificationen viel die Töpler-Hagensche Luftpumpe in Gebrauch, bei welcher die auszupumpende Röhre mit einer grösseren Glaskugel in Verbindung steht, aus der man durch Füllen mit Quecksilber die Luft austreiben kann. Natürlich wird beim Austreiben der Luft aus der Kugel die Verbindung zwischen dieser und der Geisslerschen Röhre abgeschnitten und erst nach Erzielung des Vacuums wiederhergestellt.

lung“; diese Arbeiten gipfelten in der Erfindung des Radiometers oder der Lichtmühle, jenes ausserordentlich schönen Instrumentes, dessen wir uns in der letzten Vorlesung bedienten. Durch diese Untersuchungen wurde Crookes auch veranlasst, die Erscheinungen bei der elektrischen Entladung in sehr verdünnten Röhren zu studiren, über die Herr Professor Hittorf in Münster schon vor Crookes ganz ausgezeichnete Untersuchungen angestellt hatte. Hittorf zuerst hat die goldgrüne Fluoreszenz rund um die Kathode bemerkt, welche bei einer äusserst starken Verdünnung aufzutreten pflegt. Er hat gefunden, dass dieser goldene Schimmer, unähnlich der bei einer geringeren Verdünnung auftretenden Lichtsäule, von Strahlen herührt, welche sich weigern, „um die Ecke“ zu gehen. Er fand auch, dass die Kathodenstrahlen kraft ihrer geradlinigen Fortpflanzung¹⁾ gleich den Lichtstrahlen Schatten werfen.

An dieser Stelle die Versuche von Hittorf aufnehmend, fand Crookes, dass die Kathodenstrahlen sich vollkommen anders verhalten als jede andere bekannte Strahlenart. Er stellte fest, dass das Kathodenlicht von der Oberfläche der Kathode aus-

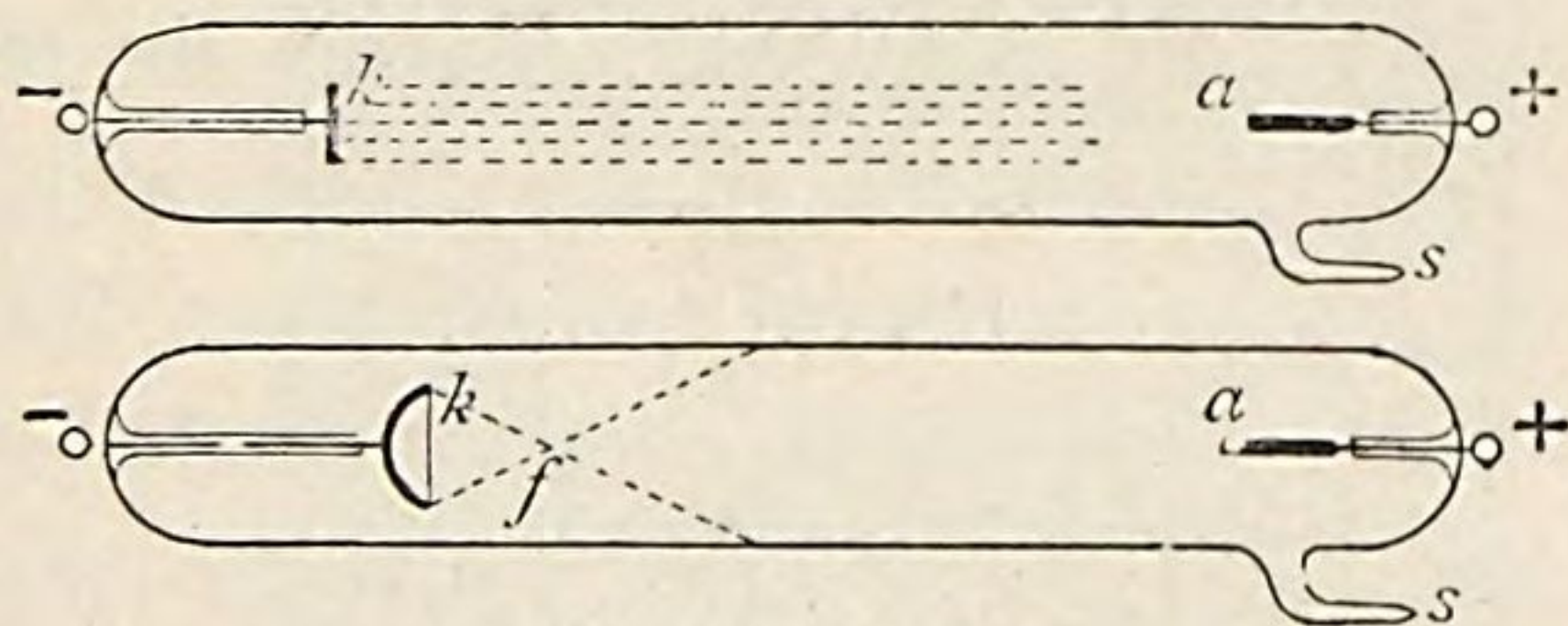


Fig. 120 und 121.

geht, sich in geraden Linien fortpflanzt, entsprechend dem Grad der Verdünnung bis zu einer gewissen Entfernung vordringt, deren Grenze durch den sogenannten „dunklen“ oder Crookesschen Raum markirt wird, und dass es die helle Fluoreszenz verursacht, sobald die Verdünnung einen solchen Grad erreicht hat, dass sich der dunkle Raum bis zur Wand der Glasröhre erstreckt. Diesen Fingerzeig benutzend, fertigte Crookes Röhren, in denen die bisher aus einem einfachen Draht bestehende Kathode die Form eines flachen Tellers oder einer hohlen Fläche besass (Fig. 120 und 121). Der ebenen Scheibe entströmen die Kathodenstrahlen als paralleles Strahlenbüschel. Nach Crookes sind diese Kathodenstrahlen nichts anderes als negativ geladene materielle Moleküle („strahlende Materie“), welche von der Metallfläche senkrecht zu ihr fortgeschleudert werden. Zweifellos

1) Anmerkung des Uebersetzers: In Deutschland bezeichnet man daher auch die das Fluoreszenzlicht zeigenden Röhren mit den Kathodenstrahlen als „Hittorfsche“ bez. „Hittorf-Crookessche“ Röhren. Von dieser Gepflogenheit ist in dieser Vorlesung überall Gebrauch gemacht worden.

giebt es solche geschleuderte Moleküle des zurückgebliebenen Gases; auch haben diese gewiss ihren Antheil bei den Entladungserscheinungen, indem sie die entgegengesetzte Wand der Glasröhre bombardiren. Es sind jedoch viele Gründe vorhanden, welche dafür sprechen, dass die Kathodenstrahlen nicht blosse Schwärme „strahlender Materie“ sind, sondern dass die geschleuderten Moleküle von Aetherwellen oder Aetherbewegungen begleitet sind, welche die Fluorescenz an den Wänden der Röhre hervorrufen. Wie dem aber auch sei, Crookes fand, dass die Kathodenstrahlen mehrere merkwürdige Eigenschaften besitzen. Abgesehen davon, dass sie Fluorescenz und Phosphorescenz in einem bis dahin unbekannten Grade zu erregen im Stande sind, vermögen sie auch eine mechanische Kraft auf die von ihnen getroffenen Körper auszuüben. Sie werfen wie gewöhnliche Lichtstrahlen Schatten von den Körpern, welche in ihren Strahlengang gebracht werden, und werden zugleich vom Magneten abgelenkt, als ob sie elektrische Ströme wären.

Hier sind einige Crookes'sche Röhren, welche die Luminescenzwirkung darthun sollen. Im Inneren der ersten Röhre sehen Sie oben eine kleine ebene Scheibe aus Aluminium angebracht, welche als Kathode dient. Von ihr strömt ein Büschel Kathodenstrahlen nach abwärts und bestrahlt einige unten befestigte Birmanische Edelsteine. Diese erglühen mit carmesinrother Farbe, und zwar intensiver, als wenn man sie bis zur Rothgluth erhitzt hätte. In der zweiten Röhre befindet sich ein schöner „Phenakit“¹⁾, welcher wie ein grosser Diamant funkelt. Sobald er den Kathodenstrahlen ausgesetzt wird luminescirt er mit lieblicher blassblauer Farbe. In der dritten Röhre befindet sich eine gewöhnliche, nur mässig verkalkte Muschelschale. Sobald sie von den Kathodenstrahlen getroffen wird, leuchtet sie hell auf und sendet auch nach Beendigung der elektrischen Entladungen für einige Minuten Phosphorescenzlicht aus.

Die nächste Röhre enthält ein mit einer Schicht Kalksulfat überzogenes Glimmerblättchen. Um die Spuren der Strahlen besser verfolgen zu können, gelangt durch einen Schlitz am Boden nur ein enges Büschel von Kathodenstrahlen nach oben, welches den Glimmer längs einer feinen hellen Linie zur Luminescenz bringt. Sobald ich einen Magneten in die Nähe der Röhre halte, werden die Strahlen

1) Eine Art weisser Smaragd, welcher in den sibirischen Smaragd-Minen gefunden und in Russland oft als sibirischer Diamant verkauft wird. Er ist nicht so brillant wie ein Diamant.

nach einer Seite abgelenkt, deren Richtung mit der Art des Magnetpoles wechselt.

Um die mechanischen Wirkungen der Kathodenstrahlen zu illustrieren, benutze ich eine Hittorf-Crookessche Röhre, deren Elektroden aus flachen Metallscheiben bestehen. Zwischen ihnen befindet sich ein gut ausbalancirtes Schaufelrad, dessen Axe auf einer eisernen Schiene läuft. Sobald der Funken des Inductoriums durch die Röhre geht, setzt sich das kleine Rad in Bewegung und läuft der Schiene entlang. Seine Schaufeln werden so bewegt, als ob ein Wind von der als Kathode dienenden Scheibe herkäme. Beim Umkehren der Stromrichtung ist auch die Bewegung der Schaufeln die umgekehrte.

Die in Fig. 122 abgebildete Crookessche Röhre hat die Gestalt einer Birne; bei ihr ist ein Metallblech in Form eines Maltheserkreuzes in den Gang der Kathodenstrahlen gestellt. Sie sehen, welcher scharfer Schatten des Kreuzes auf der Wand an dem weiteren Ende der Röhre entsteht; das ganze weitere Ende der Röhre fluorescirt eben in der charakteristischen goldgrünen Farbe mit Ausnahme derjenigen Stellen, an denen es durch das Metallkreuz vor der Bestrahlung seitens der Kathode geschützt ist.

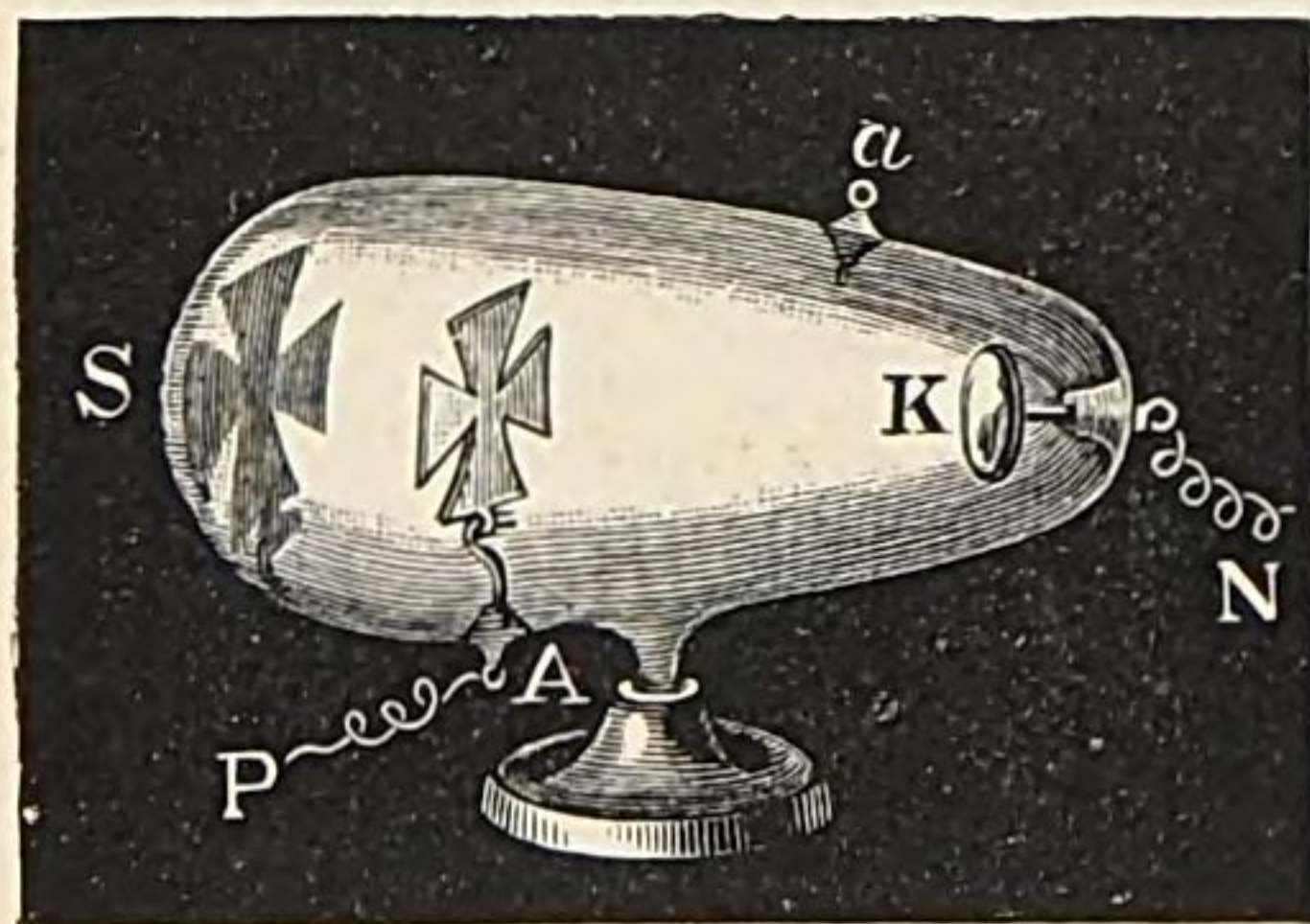


Fig. 122.

An dieser Röhre kann ich Ihnen noch ein sehr interessantes und neues Experiment zeigen, welches erst vor einigen Tagen von Professor Flemming ausgeführt wurde. Umgeben Sie die Röhre mit einer magnetisirenden Rolle, durch welche ein elektrischer Strom fließt, so übt das magnetische Feld eine bemerkenswerthe Wirkung auf den Schatten aus. Anstatt ihn auf eine Seite zu ziehen, wie es ein Hufeisenmagnet thun würde, bewirkt die magnetisirende Spule vielmehr, dass das Kreuz sich zusammenzieht und eine Drehung ausführt. Um die Wirkung besser sichtbar zu machen, habe ich die magnetisirende Spule nicht um die Röhre selbst, sondern um einen Eisenkern unterhalb des Rohrendes gestellt. So bin ich zugleich im Stande, die Wirkung zu vermehren oder zu vermindern, einfach indem ich die Röhre dem Eisenkern nähere oder von ihm entferne. Bewege ich sie nach aufwärts, so zieht sich der Schatten zusammen, wird kleiner und heller. Auch dreht er sich dabei, und zwar von oben nach unten, bis er schliesslich zu einem Punkte zusammen-

schrumpft. In dem Moment, wo er verschwindet, wird sein Platz von einem anderen zweiten grossen Schatten eingenommen, welcher beim Nähern der Röhre zum Eisenkern heller wird, sich ebenfalls herumdreht und zusammenzieht, ganz wie es sein Vorgänger that. Die Arme dieses Schattens sind gekrümmter als die des ersten Kreuzes. Im gleichen Moment, wenn das zweite Schattenkreuz erscheint, tritt noch ein dritter Schatten auf, in Gestalt eines verzerrten Ringes an der Glaswand, etwa in der Mitte zwischen Metallkreuz und Kathode. Seine Lage ist so, als ob der Schatten von Strahlen herrührte, welche

vom anderen Ende der Röhre aus divergiren. Leider kennen wir bis jetzt noch keine Erklärung dieser bemerkenswerthen Experimente.



Fig. 123.

Die letzte der Röhren hat als Kathode eine grosse hohle Elektrode aus Aluminium (Fig. 123). Diese kugelförmige Elektrode vereinigt die Strahlen in einem Punkte, der ein wenig oberhalb der Mitte der Röhre gelegen ist. Crookes fand, dass die in dieser Weise auf irgend einen Gegenstand concentrirten Kathodenstrahlen daselbst eine grosse Wärmeentwicklung hervorbringen. Glas wird geschmolzen, Diamanten werden verkohlt. Platinblech wird rothglühend und ebenfalls geschmolzen, falls die Concentration des Strahlenbüschels eine vollkommene ist. In der vor Ihnen befindlichen, schon vor zehn Jahren gefertigten Röhre ist ein Stück dünnen Platinblechs aufgehängt, um von den concentrirten Strahlen erhitzt werden zu können. Dasselbe ist absichtlich so gestellt, dass es sich nicht genau im Focus befindet. Mit Hülfe eines kleinen Hufeisenmagneten kann ich aber die Strahlen ein wenig ablenken und ihren Vereinigungspunkt so verschieben, dass er genau auf das Blech fällt: Sie sehen wie dasselbe allsobald zu hoher Weissgluth erhitzt wird.

Seit jener Zeit, es sind bald 20 Jahre her, als diese schönen und überraschenden Experimente von Crookes angestellt wurden¹⁾,

1) Anmerkung des Uebersetzers: Goldstein hat zur gleichen Zeit, ähnlich wie Crookes, über die Kathodenstrahlen gearbeitet. Ihm gebührt die Entdeckung der von der Kathode nach rückwärts ausgehenden „Canalstrahlen“, welche sich als vom Magneten nicht ablenkbar erwiesen. Neuerdings hat W. Wien auch die

ist viel über die Natur der geheimnissvollen Kathodenstrahlen discutirt worden, deren Eigenschaften so ausserordentlich verschieden von denen der gewöhnlichen Lichtstrahlen sind, dass selbst die Anwendung des Namens „Strahl“ für dieselben gewagt erscheint. Crookes eigener Ausdruck „strahlende Materie“ wurde verworfen, da er nothwendig die Annahme der materiellen Natur der Kathodenstrahlen involvirte; und doch scheint kein anderer Ausdruck geeignet, um Crookes Ansicht wiederzugeben, gemäss welcher sie nichts anderes als geschleuderte elektrisirte Partikelchen sind. Allgemein aber wurde vermuthet, dass sie nur in einem Rohr zu Stande kämen, dessen Vacuum ein ausserordentlich vollkommenes wäre.

Im Jahre 1894 gelang es jedoch Dr. Philipp Lenard auf Grund einer von Professor Hertz¹⁾ gemachten Beobachtung, die Kathodenstrahlen aus der Vacuumröhre heraus in die Luft unter gewöhnlichem Atmosphärendruck zu locken. Zu diesem Zweck versah er die Röhre auf der der Kathode entgegengesetzten Seite mit einem kleinen Fensterchen aus dünnstem Aluminiumblech wie es Fig. 124 zeigt. Die Form der Röhre war die-

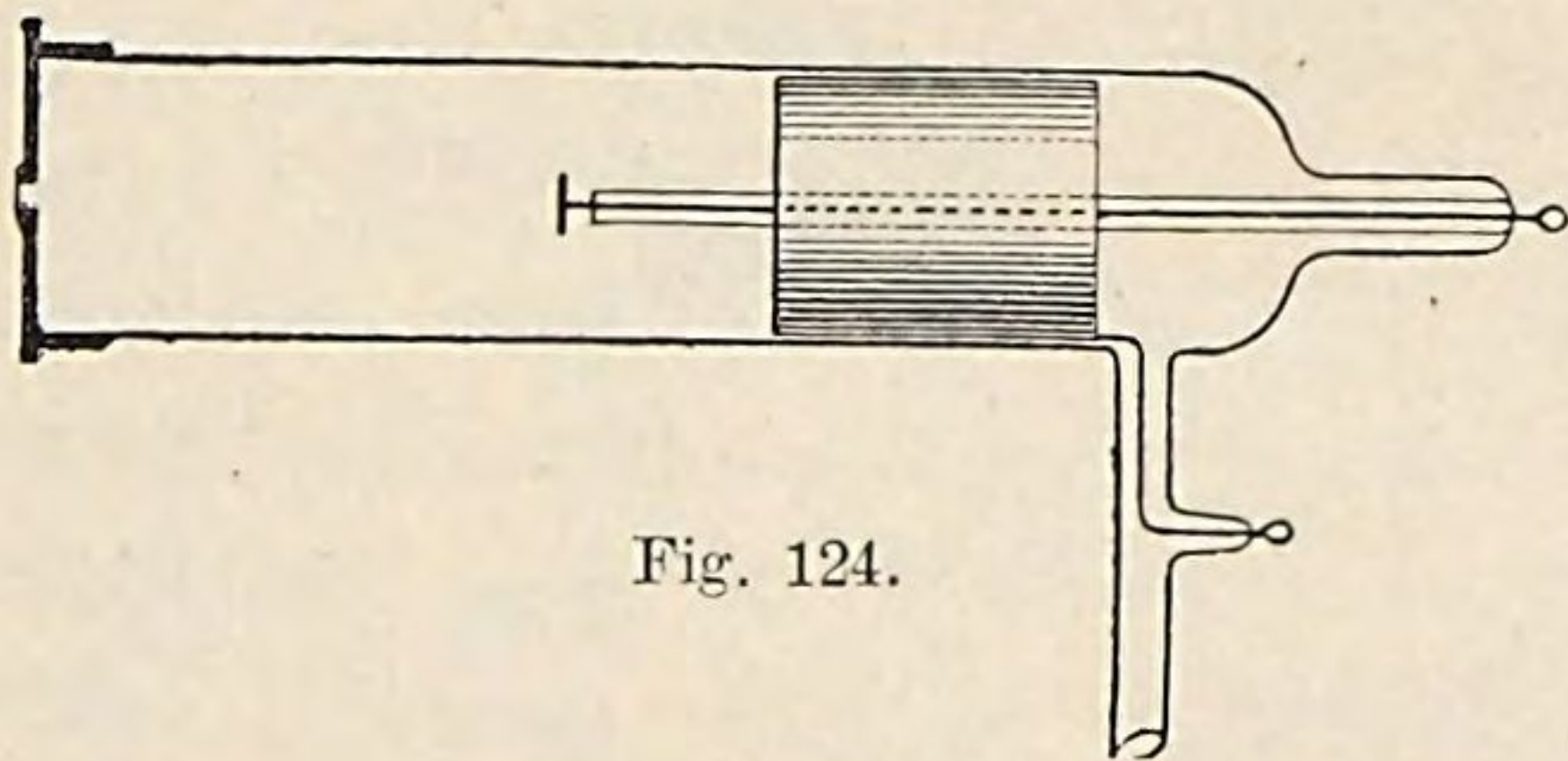


Fig. 124.

selbe, welche Hertz vor ihm gebraucht hatte, nämlich die eines Cylinders mit einer kleinen Kathodenscheibe am Ende eines axialen Drahtes, der seinerseits durch eine ihn umgebende Glasröhre geschützt war. Die Anode bestand aus einer cylindrischen, an der Wand anliegenden Metallröhre, deren Lage aus Fig. 124 zu ersehen ist. Auf das entferntere Ende der Röhre war eine Metallkappe aufgekittet mit einer Oeffnung in der Mitte, welche durch ein Aluminiumblättchen von der Dicke eines $\frac{1}{300}$ Millimeters luftdicht verschlossen war. Bei genügender Verdünnung der Luft im Innern der Röhre gelangen aus ihr durch dieses Aluminiumfensterchen hindurch Strahlen in den freien Luftraum, welche, falls sie nicht einfach verlängerte Kathoden-

Ablenkbarkeit dieser Goldsteinschen Canalstrahlen nachweisen und zeigen können, dass sie im Gegensatz zu den gewöhnlichen, negativ geladenen Kathodenstrahlen positive Elektrizität mit sich führen. (Siehe Verhandlungen der Physik. Gesellschaft zu Berlin, Februar 1898.)

1) Hertz bemerkte, dass das Glas noch fluorescirte, auch wenn im Innern der Röhre ein dünnes, für gewöhnliches Licht undurchsichtiges Aluminiumblech zwischen Kathode und die fluorescirende Stelle der Glaswand gebracht wurde.

strahlen sind, mit denselben doch nahe verwandt sein müssen. Sie können durch den Magneten abgelenkt werden, wenn auch je nach dem Vacuum im Innern der Röhre in verschiedenem Maasse; auch können sie Luminescenz erregen. Lenard erforschte die nach ihm benannten Strahlen mit Hülfe eines kleinen Lumineszenzschirms, bei welchem die fluorescirende Substanz „Pentadecylparatolykton“ war. Er fand auch, dass sie eine photographische Platte zu belichten im Stande sind und benutzte sowohl diese Eigenschaft, wie diejenige Luminescenz zu erregen, um festzustellen, bis zu welchem Grade die neuen Strahlen die verschiedenen Substanzen zu durchdringen vermögen.

Er wies ferner nach, dass die Luft unter gewöhnlichem Druck die Strahlen nicht gut hindurchlässt, sich vielmehr wie ein „trübes“ Medium verhält, während dünne Aluminium- und Kupferbleche die Strahlen leicht hindurchlassen. Auch erzielte er eine Einwirkung

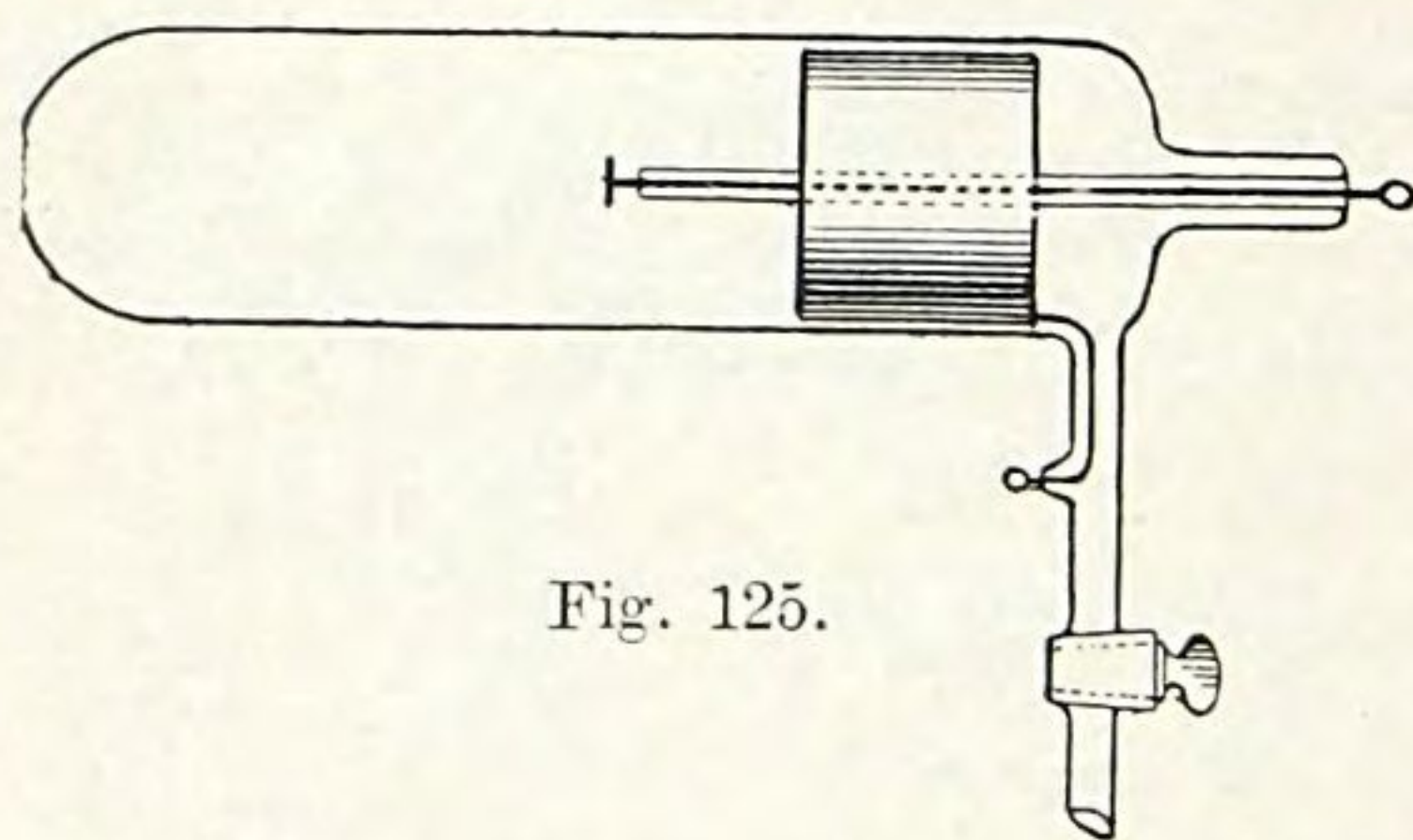


Fig. 125.

auf eine photographische Platte, welche in einem Gehäuse aus Aluminium eingeschlossen war; ebenso die Entladung eines Elektroskops, welches von einer Metallhülse umgeben war. Diese Untersuchungen wurden in den Jahren 1894 und 1895 ausgeführt und genau publicirt. Trotzdem erregten

sie kein allgemeineres Aufsehen, wenn ihnen auch von den Physikern ein äusserst grosses Interesse geschenkt wurde.

Wie ich Ihnen am Anfang mitgetheilt habe, begann Röntgen seine Untersuchungen mit dem ausgesprochenen Zweck, die Versuche von Hertz und Lenard in Bezug auf die Emission der Kathodenstrahlen zu wiederholen. Genau wie Lenard benutzte auch Röntgen zur Erforschung der Strahlen einen Lumineszenzschirm und experimentirte mit einer Hittorf-Crookeschen Röhre (Fig. 125) in einer Form, welche der Lenardschen ähnelt und thatsächlich mit der von Hertz benutzten Röhre identisch ist. Das der Kathode gegenüberliegende Ende bestand einfach aus Glas ohne Metallkappe, beziehentlich Aluminiumfenster. So ausgerüstet, fand er auf die schon beschriebene Weise jene geheimnissvollen Strahlen, die er mit charakteristischer Bescheidenheit als „X-Strahlen“ bezeichnete und welche jetzt als Röntgenstrahlen überall bekannt sind. Die Röntgenstrahlen sind nicht identisch mit den Kathodenstrahlen, obwohl sie durch letztere verursacht werden. Kathodenstrahlen gehen eben nicht durch Glas und werden vom Magneten abgelenkt, während gerade umgekehrt

die Röntgenstrahlen durch Glas hindurchgehen und durch den Magneten nicht abgelenkt werden. Sie scheinen thatsächlich erst nach Zerstörung der Kathodenstrahlen zu Stande zu kommen, denn sie haben zum Ursprung jene Stelle, an welcher ein fester Körper, zu dem sich am besten dichte Metalle wie Platin oder Uran eignen, von den Kathodenstrahlen getroffen werden. Die Röntgenstrahlen sind weder identisch mit den gewöhnlichen Lichtstrahlen noch mit den ultrarothten Wärmestrahlen, noch mit den ultravioletten chemisch wirksamen Strahlen, obgleich sie den letzteren, was chemische Wirkung und Luminescenzerregung anlangt, sehr nahe kommen.

Ultraviolettes Licht kann aber, wie wir gesehen haben, gespiegelt, gebrochen und polarisirt werden, während den Röntgenstrahlen diese Eigenschaften nicht zukommen.¹⁾ Noch auch sind die Röntgenstrahlen identisch mit den Lenardstrahlen; denn letztere sind in verschiedenem Grade durch den Magneten ablenkbar und gegen sie ist Luft viel weniger durchlässig als gegen die Röntgenstrahlen. Röntgen scheint Glück gehabt zu haben in Bezug auf die Mittel zur Herstellung eines sehr vollkommenen Vacuums: Denn die erfolgreiche Erzeugung von Röntgenstrahlen hängt thatsächlich von der Vollkommenheit des Vacuums mehr als von allen anderen begleitenden Umständen ab. Das Vacuum, welches ausreicht, um Luminescenz hervorzubringen, das Schattenkreuz zu erzeugen oder im Focus der Kathodenstrahlen Wärme zu entwickeln, ist noch lange nicht ausreichend, um Röntgenstrahlen zu erzeugen. Zu diesem

1) Wohl ist Reflexion vorhanden, aber dieselbe ist unregelmässig; die vermutheten Fälle regelmässiger Reflexion, beobachtet von Lord Blythswood und Anderen, gehören in das Reich der Fabel. Diffuse Reflexion von Röntgenstrahlen findet statt an polirten Metallen, besonders am Zink, ähnlich der diffusen Reflexion der gewöhnlichen Lichtstrahlen am Gyps oder Papier. Was die Brechung anlangt, so glauben Perrin in Paris und Winkelmann in Jena unabhängig von einander gefunden zu haben, dass beim Aluminium eine schwache Brechung vorhanden sei. Aber die in einem solchen Prisma nach der brechenden Kante beobachtete Ablenkung ist so ausserordentlich klein, dass sie schwerlich von den unvermeidlichen Beobachtungsfehlern zu unterscheiden ist. Auch konnte bisher weder die Polarisation noch die Interferenz der Röntgenstrahlen nachgewiesen werden. Wohl behaupten einige Beobachter Beugungsstreifen erhalten zu haben, mit Hülfe deren sie die Wellenlänge der Röntgenstrahlen bestimmt haben. Einige dieser Versuche ergeben aber eine Wellenlänge, welche grösser ist als diejenige der rothen Lichtstrahlen, während andere eine Wellenlänge ergeben, die kleiner ist als diejenige der ultravioletten Strahlen: alle diese Bestimmungen sind höchst wahrscheinlich zurückzuführen auf unbekannt gebliebene Fehlerquellen bei der Untersuchung.

Zweck muss die Verdünnung viel weiter getrieben werden und zwar fast bis zu einem so hohen Grade, dass die Röhre anfängt nichtleitend zu werden.

Röntgen hatte die Eigenschaften der neuen Strahlen so gründlich studirt, ehe er seine Entdeckung der Welt mittheilte, dass wenig für Andere zu thun übrig blieb. Nur ein Punkt verdient besondere Erwähnung; er betrifft die Verbesserung in der Herstellung der Röhren. Röntgen hatte gezeigt, dass seine Strahlen von der Stelle ausgehen, an welcher die Kathodenstrahlen die Glaswand der Röhre treffen

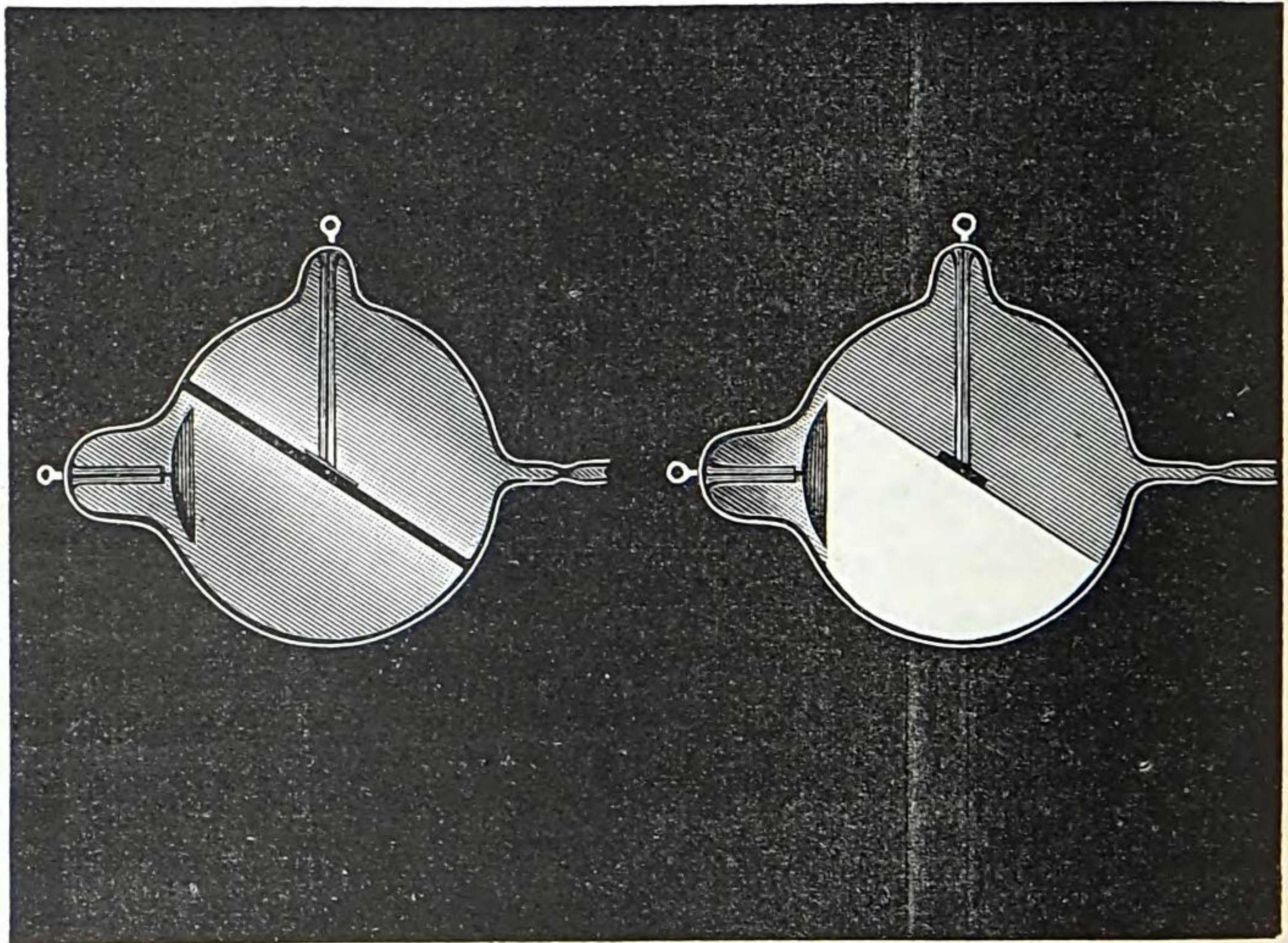


Fig. 127.

Fig. 128.

und zur Fluorescenz bringen. Daraus folgerten Manche, dass vor allem die Fluorescenz für die Entstehung der X-Strahlen vortheilhaft sei. Zu gleicher Zeit fanden aber verschiedene Forscher, dass die Emission von Röntgenstrahlen viel intensiver sei, wenn man die Kathodenstrahlen auf einem Metallstück concentrirte. Als ich letztes Frühjahr die Bedingungen studirte, unter denen die Strahlen entstehen, fand auch ich, dass die besten Strahlengeber jene Substanzen sind, welche nicht fluoresciren — nämlich die Metalle. Ich fand, dass Zink, Magnesium, Aluminium, Kupfer und Eisen ansprechen; besser als alle diese Metalle jedoch ist Platin und am besten von allen Uran. Indem ich die Kathodenstrahlung gegen eine Zielscheibe oder „Anti-Kathode“ aus Platin dirigirte, welche in der Mitte der Röhre befestigt war, beobachtete ich sorgfältig mit Hülfe eines fluorescirenden

Schirmes während der Herstellung der Luftverdünnung in der Röhre die strahlende Wirkung der Oberfläche. Sobald das Stadium der Verdünnung erreicht ist, bei welchem die Hittorf-Crookesschen Schatten entstehen, bedarf es noch weiterer Verdünnung, ehe auch nur eine Spur von Röntgenstrahlen auftritt. Die erste Wirkung scheint zu gleicher Zeit von der vorderen und hinteren Fläche der Zielscheibe auszugehen (siehe Fig. 127), wenigstens ist auf dem Schirm zwischen

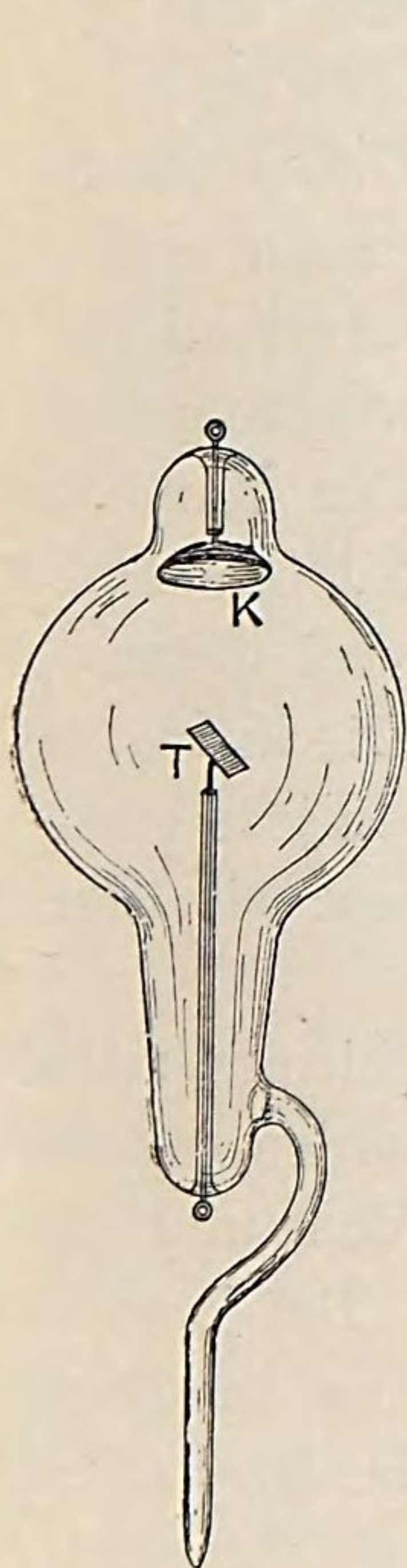


Fig. 129.

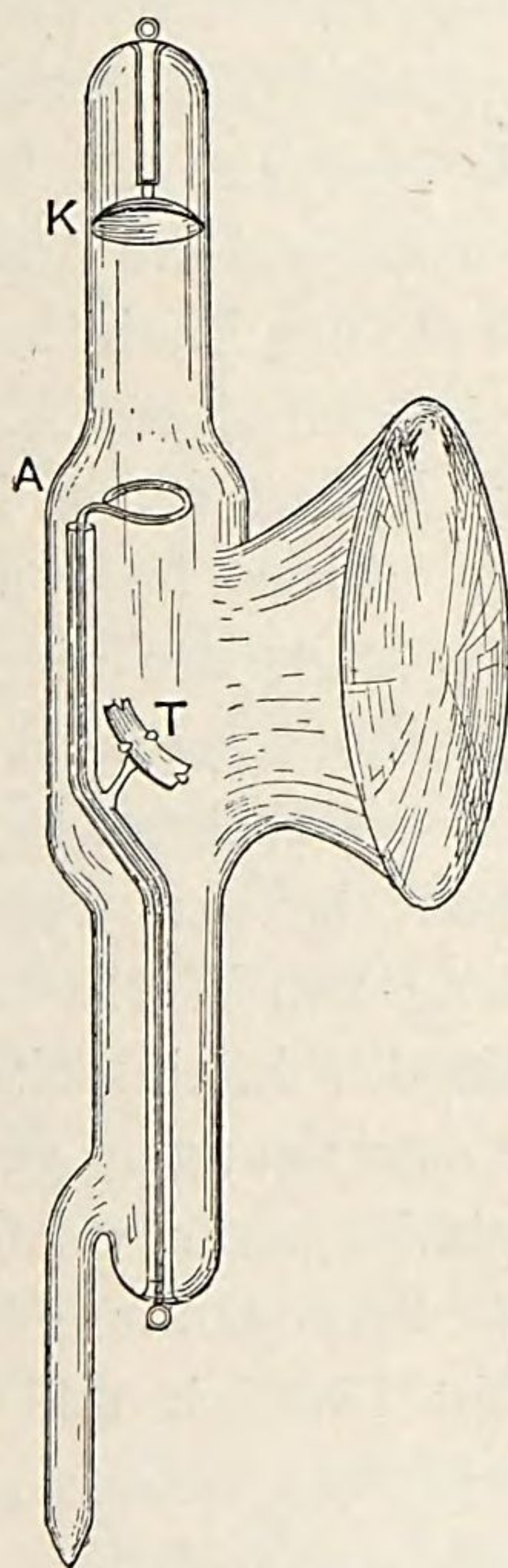


Fig. 130.

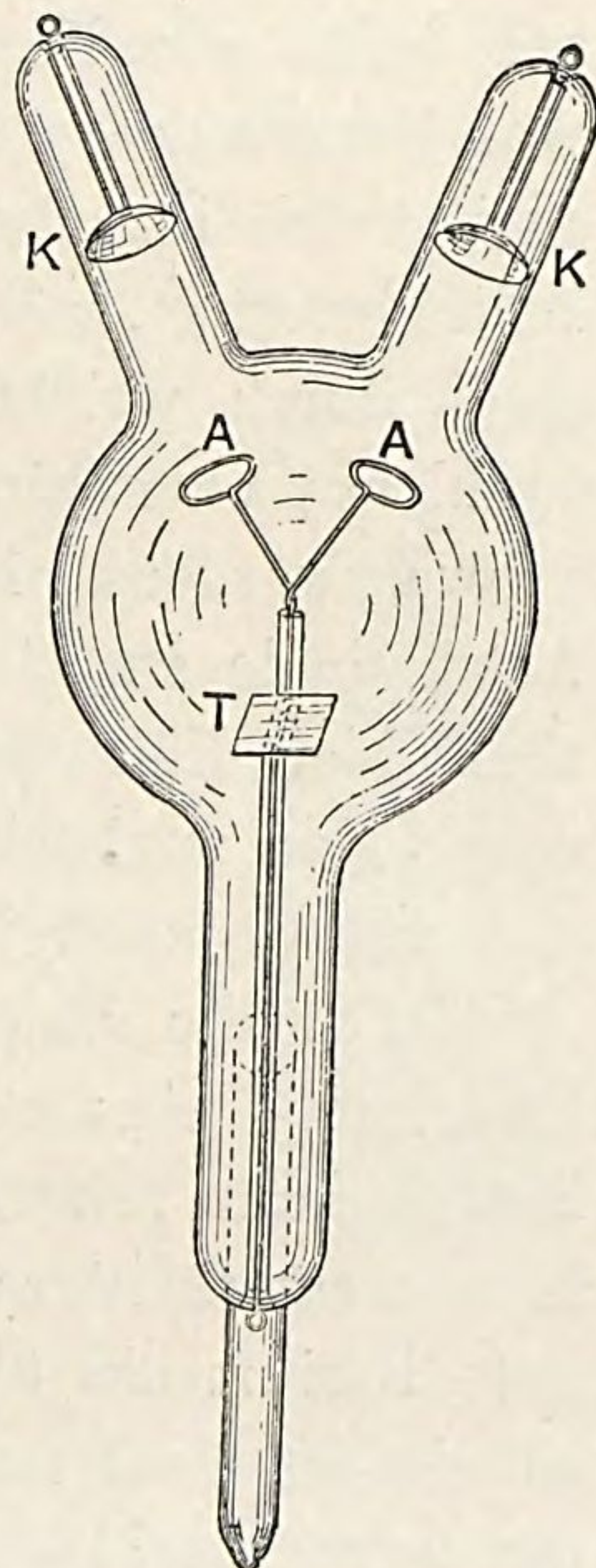


Fig. 131.

zwei theilweise erleuchteten Regionen eine zur Ebene der Antikathodenscheibe correspondirende Linie zu erblicken. Führt man mit der Verdünnung noch weiter fort, so nimmt die Wirkung der Rückseite ab, während die der vorderen zunimmt (siehe Fig. 128), wobei die Strahlen fast senkrecht zur Ebene der Antikathode emittirt werden. Diese seitliche Ausstrahlung ist ganz und gar unähnlich der Strahlung oder Reflexion beim gewöhnlichen Licht und muss bei irgend welcher Theorie der Röntgenstrahlen in Rücksicht gezogen werden.

Die Röhre, welche ich beim Beginn dieser Vorlesung benutzte und am Ende der Vorlesung wieder gebrauchen werde, um Ihnen die

Knochen Ihrer eigenen Hand zu zeigen, gehört zur Klasse der Focus-Röhren und hat die in Fig. 129 a. v. S. angegebene Form. Die Concentration der Kathodenstrahlen auf dem kleinen Platinscheibchen *T*, welches bei längerer Wirkung der Röhre rothglühend wird, bringt zweierlei Vortheile mit sich. Erstens ist die Ausstrahlung eine intensivere als wenn die Oberfläche der Glaswand als Antikathode benutzt würde, zweitens gehen die Röntgenstrahlen von einer kleineren Fläche aus, sodass die Schatten der Objecte viel deutlicher werden. Hier sind noch zwei weitere Röhren neuerer Construction (Fig. 130 und 131), bei denen das Focus-Princip gewahrt ist, bei denen aber insofern eine Verbesserung erreicht wurde, als die Antikathode nicht zugleich auch Anode ist. Bei ihnen ist die aus Platin bestehende Antikathode *T* isolirt befestigt, während die Anoden *A* aus Aluminiumringen gebildet sind, durch welche das von *K* kommende kegelförmige Kathodenstrahlenbüschel hindurchgeht. Diese Röhren sind der Gefahr des Schwarzwerdens nicht so ausgesetzt, wie die Röhren, bei denen die Antikathode zugleich auch als Anode gebraucht wird. Die in Fig. 131 abgebildete Röhre hat zwei concave Elektroden, von denen jede einzeln oder beide zugleich als Kathode benutzt werden können; sie eignet sich am besten bei Anwendung von Wechselstrom.

Um die Empfindlichkeit des luminescirenden Schirmes zu erhöhen sind ebenfalls viele Anstrengungen gemacht worden. Zuerst konnte kein reines Bariumplatincyranür erhalten werden und man fand wasserhaltiges Kalium-Platincyranür günstiger. Da jetzt das gute Bariumsalz überall leicht käuflich und leichter zu handhaben ist als das Kaliumsalz, bedient man sich fast allgemein des Bariumplatincyranürs als luminescirender Substanz.

Der Erwähnung werth ist vielleicht auch noch die auf der Unkenntniss der Röntgenschen Entdeckung fussende Erscheinung, dass verschiedene Experimentatoren eine neue Erfindung gemacht zu haben glaubten, wenn sie sich eines fluorescirenden Schirmes bedienten. Der eine setzte einen Fluoreszenzschirm auf den Boden einer Pappröhre, brachte ein Guckloch am oberen Ende an und nannte das Ganze dann „Kryptoskop“. Ein anderer am andern Ende der Welt setzte einen fluorescirenden Schirm auf den Boden einer zierlichen Röhre aus Carton, versah sie mit einem Handgriff und einer beweglichen Oeffnung, um deren Grösse dem Auge anzupassen und betitelte dieses sinnreiche Instrument: „Fluoreskop“. Beide Apparate sind brauchbar; aber die Erfindung an beiden gebührt Röntgen.

Innerhalb weniger Tage nach der Erfindung Röntgens wurde eine neue Wirkung der X-Strahlen unabhängig von mehreren Beobachtern entdeckt, welche dem Scharfsinn Röntgens entgangen war. Es ist seit mehreren Jahren bekannt, dass ein elektrisirter Körper entladen wird, wenn ultraviolettes Licht auf ihn fällt. Dies tritt freilich nur ein, wenn die Ladung negativ ist, denn die positiv geladenen Körper werden vom ultravioletten Licht nicht entelektrisiert. Die Röntgenstrahlen dagegen entladen eine metallische Oberfläche in Luft, gleichviel ob dieselbe positiv oder negativ geladen ist. Wir wollen uns von dieser Wirkung durch ein Experiment überzeugen. Ich habe hier ein nach Exners Vorschlag gebautes Elektroskop mit drei Metallblättchen, von denen das mittlere unbeweglich ist und die alle aus Aluminium gefertigt sind, weil dieses Metall sich zu elektroskopischen Zwecken besser eignet als Blattgold. Sie sind innerhalb einer dünnen Flasche aus böhmischem Glase befestigt, welche ganz von einem Mantel aus durchsichtiger Metallgaze umschlossen ist. Nachdem die Blättchen geladen sind — entweder positiv mittels eines geriebenen Glasstabes oder negativ mittels eines geriebenen Hartgummistabes — wird eine Metallkappe über die Flasche gestülpt (Fig. 132).

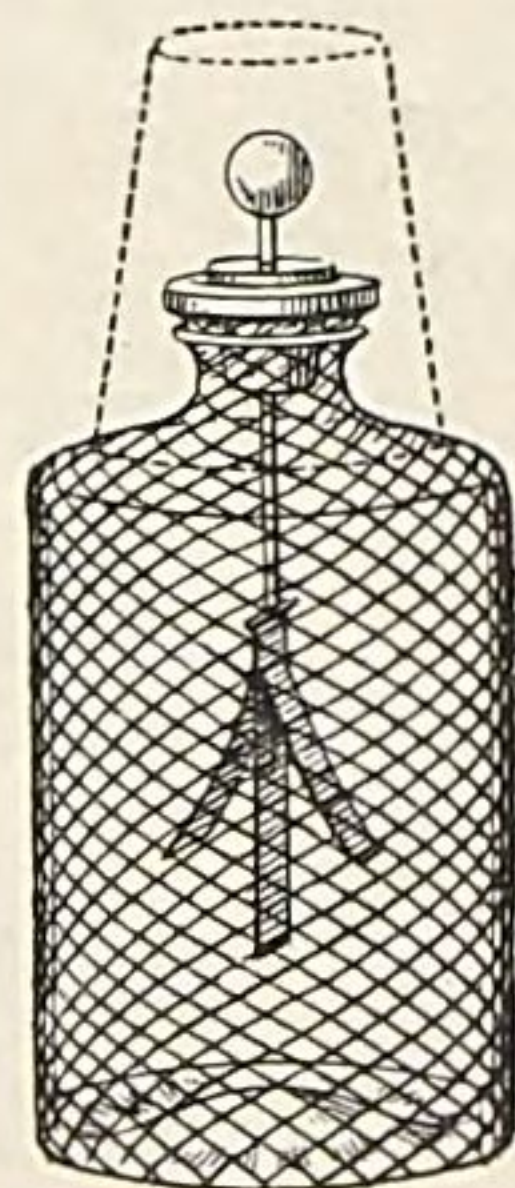


Fig. 132.

Da die Blättchen vollständig von einer Metallhülle umgeben sind, so sind sie auch vollkommen gegen äussere elektrische Einflüsse geschützt. Mein Elektroskop ist jetzt geladen und zum Versuch fertig. Um die Wirkung der X-Strahlen auf die Ladung der Blättchen besser beobachten zu können, bringe ich sie in den Gang eines cylindrischen Strahlenbüschels, welches von den Blättchen einen vergrösserten Schatten auf dem weissen Projectionsschirm entwirft. Setze ich jetzt das Elektroskop dem von einer Focusröhre in 30 cm Entfernung kommenden Röntgenlicht aus, so sehen Sie, wie in Folge der entelektrisirenden Wirkung die Blättchen zusammenfallen. Dies tritt ein, sowohl wenn die Ladung positiv als auch wenn sie negativ war.

Es bleibt mir jetzt bloss noch übrig, Ihnen einige Projectionsbilder und die Photographien zu zeigen, deren Aufnahme beim Beginn der Vorlesung stattgefunden hat. In den Figuren 133 und 134 ist die Hand eines Mädchens von 13 Jahren, einer Patientin des St. Bartholomäus-Krankenhauses, dargestellt, welches in mein Laboratorium gebracht wurde, damit die Verkrümmung der Finger festgestellt würde. Die erste der beiden Platten war zu kurze Zeit

exponirt, sodass die Knochen kaum vom Fleisch zu unterscheiden sind. Die zweite Platte ist überexponirt, sodass die Strahlen das Fleisch vollständig durchleuchtet haben und nur noch die Knochen sichtbar geblieben sind.

Figur 135 ist die Hand eines etwa elfjährigen Kindes. Bei einer Kinderhand sind die Knochen noch nicht vollständig verknöchert; die Enden sind noch gelatinös und durchsichtig, sodass es scheint, als ob zwischen den einzelnen Gliedern leere Räume vorhanden seien. Vergleichen Sie die Kinderhand mit der eines voll ausgewachsenen Menschen, so sehen Sie, wie das Alter den Anblick der Handknochen verändert.

Figur 136 ist die Hand einer voll ausgewachsenen Frau. Sie beobachten hier gleichzeitig, dass die Diamanten des Ringes durchsichtig sind, während die Metalltheile einen Schatten selbst noch durch die Knochen hindurch werfen. Diese beiden Aufnahmen sind von Herrn J. W. Gifford gemacht worden.

Figur 137 ist die Hand von Lord Kelvin; sie zeigt die Spur des Alters und Neigung zu rheumatischer Verkalkung.

Figur 138 ist die Hand von Sir Richard Webster; sie ist besonders deshalb interessant, weil sie im Fleisch zwischen Daumen und Zeigefinger zwei kleine Schrote zeigt, welche von einer Schusswunde herrühren, die Webster vor vielen Jahren erhielt.

Der Liebenswürdigkeit des Herrn Campbell-Swinton verdanke ich es, dass ich Ihnen noch eine Reihe anderer Platten zeigen kann; die Hand von Lord Rayleigh; die Hand einer Dame mit einer Nadel in der Handfläche; eine von der Gicht geschwollene Hand; ein Fuss, welcher die Knochen der Ferse, des Knöchels und die kleineren Knochen bis zu den Zehen erkennen lässt; eine Aufnahme durch die linke Schulter einer jungen Dame, bei der die Rippen, das Schulterblatt und das Brustbein zu erkennen sind; die Aufnahme des Rückens eines jungen Mannes, welche die Rippen und wenn auch nur schwach das Herz als einen mittleren dunklen Fleck erkennen lässt, der in eine dreieckige Spitze nach rechts unten, d. h. in Wirklichkeit also nach links ausläuft. Schliesslich zeige ich noch den Schatten eines lebenden Kopfes, an welchem man vor allem die Halswurzel studiren kann.¹⁾

1) Anmerkung des Uebersetzers: Die auf den nicht nummerirten Blättern enthaltenen Aufnahmen sind im Original nicht vorhanden. Die Abbildung des Armes ist dem Verlage von Wilhelm Knapp in Halle entlehnt, die Aufnahme des Brustkorbs und der Beckenknochen vom chirurgischen Institut der Universität in Halle gütigst zur Verfügung gestellt worden.

Hier wiederum ist das Schattenbild eines neugeborenen Kindes, aufgenommen durch Herrn Sydney Rowland; beachten Sie den scheinbar unvollkommenen Zustand des Knochengerüsts.

Schliesslich wollen wir noch die „Bilder“ einiger Thiere betrachten. Hier ist ein Chamäleon, von dem sowohl das Skelett wie die inneren Eingeweide deutlich erkennbar sind; hier ist ferner eine Maus, ein Frosch und ein Fisch. Die nächste Aufnahme ist die einer ägyptischen Mumie in ihrer Umhüllung. Ehe diese Aufnahme gemacht war, hatte man sich lebhaft darüber gestritten, ob es die Mumie einer Katze oder eines kleines Mädchens sei. Die Röntgen-Photographie hat jeden Zweifel beseitigt.

Im Anfang meiner Vorlesung erwähnte ich, dass Glas gegen Röntgenstrahlen ziemlich undurchlässig sei. Die in Fig. 139 abgebildete Aufnahme liefert den Beweis hierfür; sie stellt eine Brille dar, welche während der Aufnahme in einem Futteral gelegen hat, dessen Ueberzug aus Seehundsfell alle die diesem Fell eigenthümlichen Merkzeichen aufweist. Die nächste Aufnahme des Herrn Campbell Swinton erlaubt uns den Inhalt eines versiegelten Briefes zu lesen. Von demselben rührt auch die in Fig. 140 reproducirte Aufnahme her, welche zwei Cigarren in einem Cigarrenetui darstellt. Schliesslich zeige ich

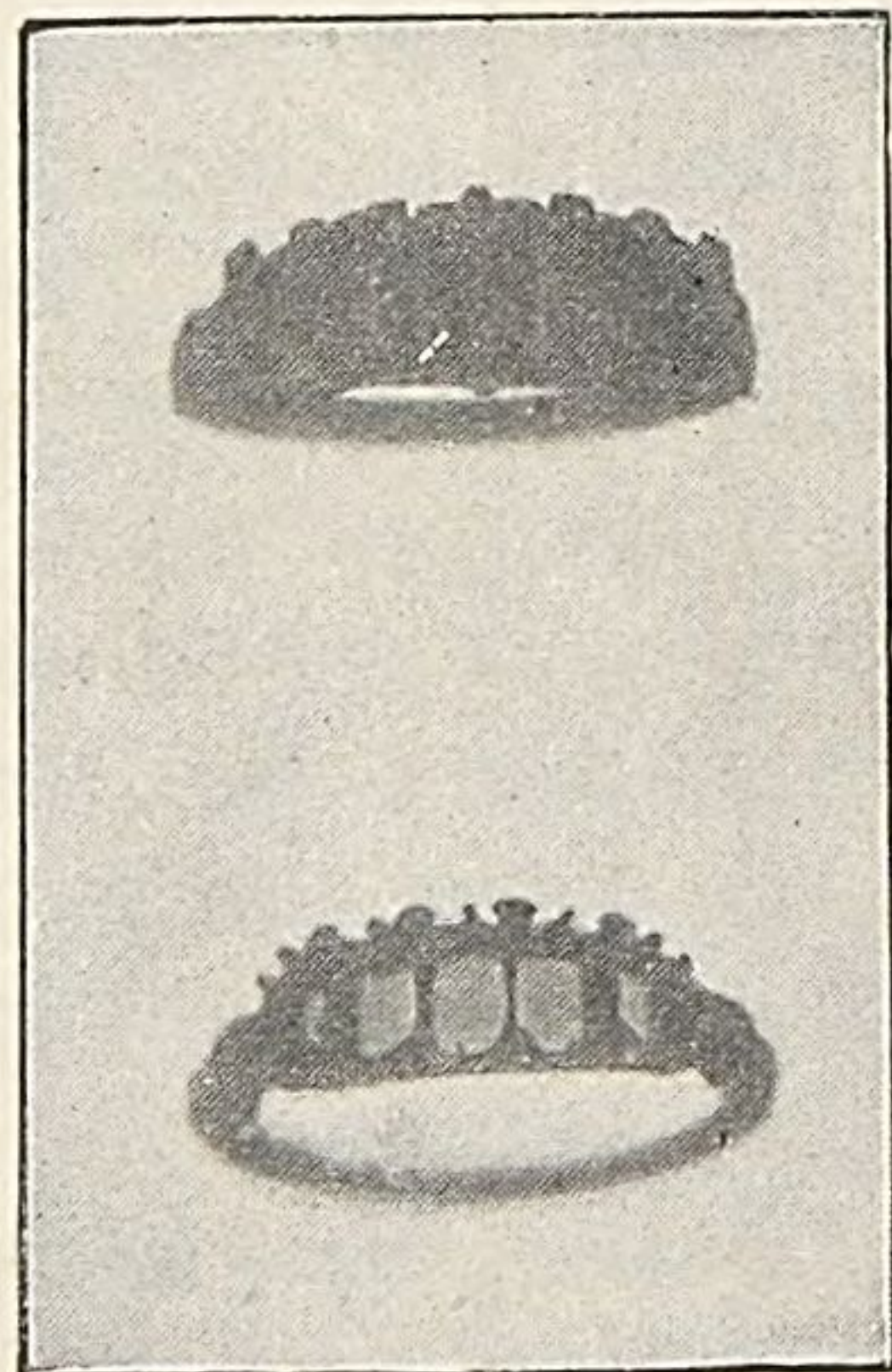


Fig. 141.

Ihnen noch eine Photographie zweier Ringe mit Rubinsteinen (Fig. 141). Beim Lampenlicht sind die Steine beider Ringe nicht von einander zu unterscheiden; im Tageslicht bedürfte es mindestens eines Sachverständigen, um zwischen beiden Steinen einen Unterschied zu entdecken. Sobald man sie aber mittels der Röntgenstrahlen betrachtet oder photographirt, schwindet jeder Zweifel. Die Rubine des einen Ringes sind echte aus Birma und erscheinen durchsichtig. Die anderen sind Imitationen aus rothgefärbtem Glas und erscheinen vollkommen dunkel und undurchsichtig.

Sie werden bemerkt haben, dass ich die Röntgenstrahlen öfter als „Röntgenlicht“ bezeichnete und sich vielleicht gefragt haben, ob ich dazu auch berechtigt bin, insofern ja dieses „Licht“ unseren Augen unsichtbar ist. Dasselbe gilt aber auch vom ultravioletten und vom ultrarothem Licht, und ebenso von den Hertzschen Strahlen¹⁾, dem

1) Vergl. hierzu die vom Uebersetzer auf S. 103 gemachte Anmerkung.

Hertz'schen Licht. Und ausser den genannten giebt es noch andere unsichtbare „Lichtarten“, von denen eine erst im letzten Jahre unabhängig von Becquerel und mir aufgefunden wurde.¹⁾

Wenn aber im Gegensatz zu den eben genannten Strahlenarten die Röntgenstrahlen weder reflectirt, noch gebrochen, weder gebeugt, noch polarisirt werden können, dann haben wir auch keinen Grund, sie als Licht zu bezeichnen. In der That fehlen die directen Beweise vollkommen dafür, dass sie aus transversalen Aetherwellen bestehen. Viele Hypothesen sind über ihre Natur aufgestellt worden. Röntgen selbst vermuthete, dass sie mit longitudinalen Aetherschwingungen identisch sein könnten, während von Anderen angenommen wurde, dass sie Aetherströme, Aetherwirbel oder selbst Ströme unendlich kleiner fester Partikelchen seien. Aber auch die Meinung machte sich bald geltend, dass die Röntgenstrahlen nichts weiter wären, als ultraviolette Aetherwellen von ausserordentlich kleiner Wellenlänge und fand vor allem Glauben bei den Physikern, welche geneigt waren, das Fehlen jeglicher Brechung und die hohe Durchgangskraft der Strahlen der winzigen Grösse der Wellen zuzuschreiben, in Folge deren sie nicht im Stande sind, die Körpermoleküle zum Mitschwingen zu erregen, sondern fast ungehindert zwischen ihnen hindurchgehen.

Die wahrscheinlichste Hypothese, welche zugleich Rechenschaft für die seltsame Emission der Strahlen senkrecht zur Oberfläche der Antikathode zu geben versucht (siehe Fig. 128 auf S. 178), ist von Sir George Stokes aufgestellt worden. Während das gewöhnliche Licht aus Wellenzügen²⁾ mit vielen Tausenden von allmählich kleiner werdenden Schwingungen besteht (Fig. 60 S. 71), nimmt Stokes an, dass die Röntgenstrahlen nur aus einzelnen Kräuselungen von nicht mehr als 1 oder $1\frac{1}{2}$ Wellen (Fig. 142) bestehen. Nach Stokes wird das Röntgenlicht an der Kathode erzeugt, und zwar durch den Stoss der fliessenden, negativ geladenen Moleküle oder Atome, welche die

1) Näheres über diese von Uransalzen ausgesandten Strahlen siehe im Anhang zu dieser Vorlesung am Ende des Buches. Der Uebersetzer.

2) Es ist seit langer Zeit bekannt, dass beim gewöhnlichen Licht jeder Wellenzug mindestens aus 50000 aufeinander folgenden Schwingungen besteht; denn es gelang Fizeau noch zwischen zwei Strahlen, welche einen Gangunterschied von mehr als 50000 Wellenlängen besitzen, Interferenzen hervorzubringen. Neuerdings hat Michelson Interferenzen bei einem viel grösseren Gangunterschied der Strahlen verwendet, um das Meter in Wellenlängen auszudrücken. (Vergl. übrigens die Anmerkung auf S. 71.)

Kathodenstrahlen ausmachen. In dem Moment, in dem jedes dieser bewegten Moleküle gegen die Zielscheibe trifft und von da zurückprallt, wird eine Vibrationsbewegung (quiver) seiner elektrischen Ladung eintreten, d. h. in anderen Worten, die Ladung des Moleküls wird eine Oscillation ausführen. Diese elektrische Schwingung wird quer durch das Molekül in einer Richtung ausgeführt, welche im Allgemeinen senkrecht zur Ebene der Zielscheibe steht und eine elektromagnetische Störung verursacht, die sich als Welle nach allen Richtungen fortpflanzt, ausser nach dort, wo sie durch die Zielscheibe gehindert ist. Diese Schwingung von ausserordentlich kurzer Periode vermag in Folge ihrer hohen Schwingungszahl zwar ebenso wie die gewöhnlichen ultravioletten Wellen ähnliche Wirkungen wie diese hervorzubringen, ist aber trotzdem nicht im Stande Interferenz, noch regelmässige Reflexion oder Brechung einzugehen, insofern sie nicht einen vollkommenen Wellenzug von vielen Kräuselungen zu erregen vermag. Um diesen Vorgang einigermaassen zu demonstrieren, benutze ich ein Modell (Fig. 143). Ein eiserner Ring, welcher gegen die Wand geschleudert werden kann, stellt das bewegte Molekül dar. Seine elektrische Ladung ist dargestellt durch ein Bleistück, welches entlang einem horizontalen Draht gleiten kann und in seiner mittleren Lage durch ein Paar Spiralen gehalten wird. Schleudert man dieses Molekülmodell gegen die Wand, so wird es zurückgeworfen; die Bleimasse kommt aus dem Gleichgewicht und führt eine Schwingung hin und her längs des Drahtes aus. Die Oscillation ist nach 1 oder $1\frac{1}{2}$ Periode abgestorben. Stellen Sie sich vor, diese Oscillation erzeuge im umgebenden Raum eine Transversalwelle, so würde diese nach aussen in derselben Weise fortgepflanzt wie vollständige Wellenzüge, obgleich sie nur aus $1\frac{1}{2}$ Kräuselungen besteht. Wären demnach Millionen solcher bewegten Moleküle in Thätigkeit, so würden diese einzelnen Wellenstösse in millionenfacher Anzahl eine nach der andern stattfinden, wenn auch nicht in so regelmässiger räumlicher Aufeinanderfolge, wie die das gewöhnliche Licht constituirenden Wellenzüge. Wiewohl diese Darlegung nur eine rohe Vorstellung von der Stokesschen Hypothese giebt, so mag sie uns hier genügen.

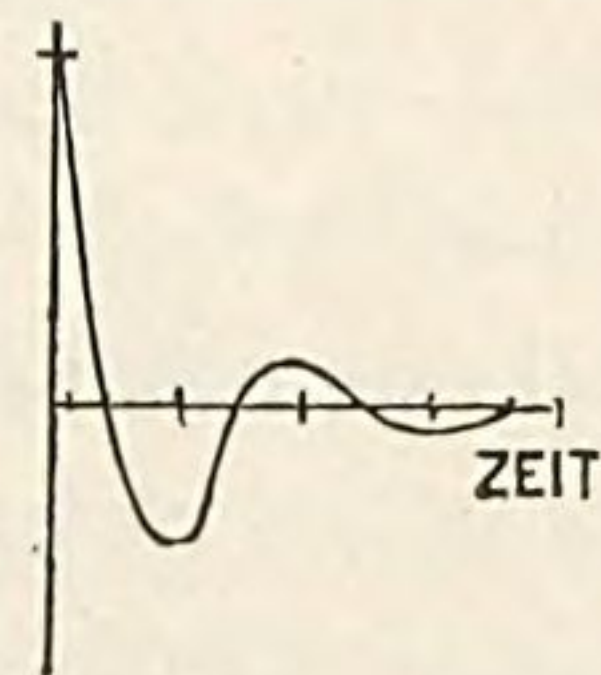


Fig. 142.

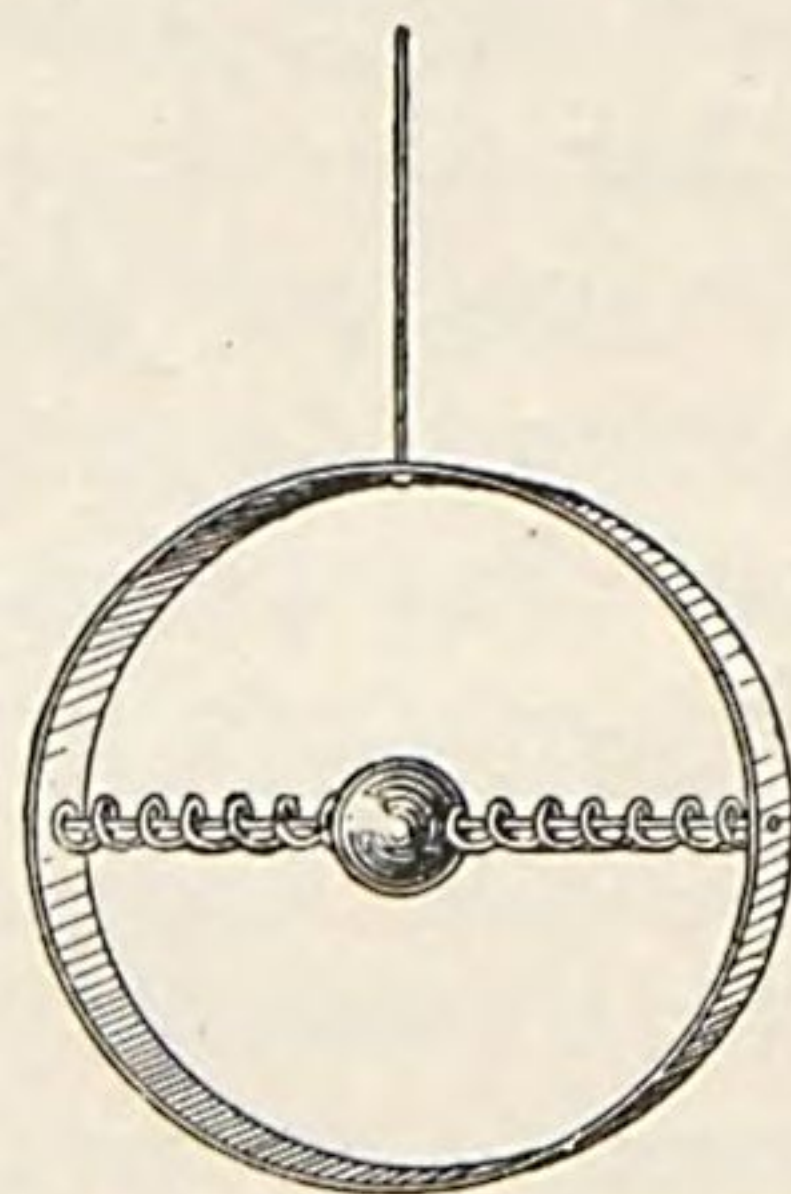


Fig. 143.

Ich kann meine Vorlesung nicht beschliessen, ohne etwas über die Aussichten gesagt zu haben, welche durch die erstaunliche Entdeckung der Röntgenstrahlen der Wissenschaft eröffnet sind. Es ist klar, dass im Himmel und auf der Erde noch viele Dinge vorhanden sind, deren Existenz uns heute nicht bekannt ist. So giebt es Töne, welche unsere Ohren niemals gehört haben und ebenso giebt es Licht, welches unsere Augen niemals sehen werden. Aber dennoch werden einige dieser unhörbaren und unsichtbaren Vorgänge von Zeit zu Zeit durch die Geduld und den unermüdlichen Fleiss der wissenschaftlichen Forscher aufgedeckt und erkannt werden. Sie haben gesehen, dass selten eine Entdeckung in der Wissenschaft plötzlich entsteht, sich vielmehr auf dem schon Vorhandenen aufbaut. Hinter Röntgen steht Lenard, hinter Lenard steht Crookes¹⁾ und diese Physiker benutzten ihrerseits wieder die Erfahrung der früheren Forscher bis hinab zum Erfinder der Luftpumpe, Otto von Guericke.

Wir haben Hittorf-Crookes'sche Röhren schon seit dem Jahre 1878 zur Verfügung gehabt; demnach haben die Röntgenstrahlen schon seit mehr als 20 Jahren existirt, obgleich deren Existenz Niemand, ehe Röntgen sie am 8. November 1895 beobachtete, geahnt und ihre Eigenschaften errathen hat.

Und wie diese Strahlen während 20 Jahren unentdeckt blieben, gerade so giebt es heute ohne Zweifel in dem Weltall andere Strahlen und andere Kräfte, von denen wir bis jetzt keine Vorstellung haben. Aber wie ein Jahr nach dem andern vergeht, so führt eine Entdeckung zur andern. Die scheinbar nutzlose und kleinliche Untersuchung des einen Forschers führt später zu einer nützlichen und technisch bedeutenden Erfindung eines andern und so schreitet die Wissenschaft fort, langsam kriechend von Punkt zu Punkt. Stetig vermehrt sich die Summe unseres Wissens und drängt Jahr für Jahr die Unwissenheit weiter und weiter zurück. Wo heute Dunkelheit, herrscht später Licht!

1) Anmerkung des Uebersetzers: Vor allem wären hier wohl ausser Crookes Hertz, Hittorf und Goldstein zu nennen.

Anhang zur ersten Vorlesung.

Allgemeine Methode der geometrischen Optik.

Die Darstellung der geometrischen Optik auf Grund der Wellenlehre des Lichtes ist vom Verfasser schon seit 15 Jahren in seinen regelmässigen Vorlesungen über Optik gegeben worden. Wenn auch die Behandlung dieser Materie vor dem Auditorium eines Weihnachtskursus in der Royal Institution, von dessen Zuhörern viele noch im Jünglingsalter stehen, naturgemäss eine sehr einfache und populäre sein muss, so blieb doch der wesentliche Charakter der Methode erhalten. Eine kurze Beschreibung dieser Lehrmethode publicirte der Autor im Jahre 1889 unter dem Titel „Notes on Geometrical Optics“, welche der physikalischen Gesellschaft zu London mitgetheilt und im Philosophical Magazine, Oct. 1889, S. 232 abgedruckt worden ist.

Da die Entwicklung der Methode in dieser Vorlesungsreihe nur oberflächlich gestreift werden konnte, hält es der Autor für nützlich, in einem Anhang die Methode specieller darzustellen und ihre Anwendung zur Herleitung der Formeln für Linsen und Spiegel zu erläutern. Diese Formeln sind thatsächlich auf diesem Wege viel schneller abzuleiten, als durch die beschwerlichen Methoden, welche in Folge ihrer Wiedergabe in den meisten Lehrbüchern der Optik geheiligt sind.

Grundlage der Methode.

Wenn wir die Optik von diesem neuen Gesichtspunkt aus betrachten, haben wir uns mit Oberflächen statt mit blossen Linien zu beschäftigen. Die Wellen schreiten stets senkrecht zu ihren Oberflächen fort; eine Aenderung in der Form der Wellenfläche ändert auch die Richtung der Fortpflanzung. Die Wellenoberfläche ist statt des „Strahles“ zu setzen. Daher wird die Krümmung der Oberfläche der wichtigste Punkt der Betrachtung. Der ganze Einfluss, welchen irgend eine Linse oder ein Spiegel oder irgend ein

System von Linsen und Spiegeln auf einen Wellenzug ausüben kann, besteht lediglich darin, der Wellenfläche des Strahlenbüschels eine gewisse Krümmung aufzudrücken. Ist die Wellenfläche anfangs eine Ebene, so bewirkt die Linse oder der Spiegel eine Krümmung der Wellenfläche, in Folge deren sie entweder nach einem Punkt hin (reeller Bildpunkt) oder von einem Punkte fortschreitet (virtueller Bildpunkt). Besitzt die Welle schon eine anfängliche Krümmung, dann kann die Linse bzw. der Spiegel nichts weiter bewirken, als die Krümmung der Oberfläche verändern, wobei die resultirende Krümmung gleich ist der algebraischen Summe der Anfangs- und der durch die Linse bewirkten Krümmung. Wie wir sehen werden, dreht es sich bei dieser neuen Methode lediglich darum, zu wissen, welche Krümmung eine Linse oder ein Spiegel einer ebenen Welle aufdrückt: Es ist dies gleichbedeutend damit, was die Optiker als „Kraft“ (power) oder kurz als „Stärke“ bezeichnen, wobei die Stärke oder „Focalkraft“ umgekehrt proportional ist der Brennweite oder „Focallänge“.

Ein anderer, fast ebenso wichtiger Vorzug der Methode besteht in der Möglichkeit, statt des sogenannten Brechungsexponenten eine diesem reciproke Grösse verwenden zu können, welche als „Geschwindigkeits-Constante“ eingeführt werde. Der Gebrauch des Brechungsexponenten rührt noch von jener Zeit her, in der die Erkenntniss fehlte, dass die Brechung lediglich eine Folge der Aenderung der Fortpflanzungsgeschwindigkeit der Lichtwellen beim Uebergang von einer Substanz in eine solche von anderer optischer Beschaffenheit ist. Der Brechungsquotient ist ein blosses Verhältniss der Sinus (oder eigentlich der Cosecanten) der beobachteten Winkel beim Einfall des Strahles in ein zweites Medium und bei seinem Austritt aus dem ersten. Wie nutzlos es ist, sich bei Ableitung der Linsenformeln auf den Brechungsindex als Fundamentalgrösse zu beziehen, geht einfach daraus hervor, dass man schon bei Aufstellung der allerersten Formel gemäss der „orthodoxen“ Methode von dem Sinus absehen und statt seiner den Winkel setzen muss, gerade wie es Kepler gethan, noch ehe das Snelliussche Brechungsgesetz bekannt war. Die elementaren Formeln für Linsen etc. stehen in der That noch heute auf dem Standpunkt von Kepler. Und doch weiss heute jeder, dass die Geschwindigkeit des Lichtes, auf welcher in letzter Instanz die Brechung beruht, in optisch dichteren Substanzen geringer ist, als in Luft. Die Fortpflanzungsgeschwindigkeit in der Luft beträgt ungefähr 300 000 Kilometer in der Secunde. Nehmen wir

die Geschwindigkeit in Luft zur Einheit, dann ist die Zahl, welche die Geschwindigkeit in einem dichteren Medium, wie z. B. Glas und Wasser, ausdrückt, nothwendig kleiner als Eins und ausserdem verschieden für verschiedene Wellenlängen. Als Einheit für die Lichtgeschwindigkeit ist hier diejenige in Luft statt derjenigen im Vacuum genommen, weil im Allgemeinen Linsen und optische Instrumente in Luft gebraucht werden. Die Zahl nun, welche die relative Geschwindigkeit des Lichtes in einem beliebigen Medium zu derjenigen in Luft angiebt, heisse die „Geschwindigkeitsconstante“ (velocity-constant). Letztere ist z. B. für Wasser in Bezug auf Licht mittlerer Wellenlänge (etwa Gelb) gleich 0,75; für Crown Glas 0,65; für Flintglas, je nach seiner Dichtigkeit, nur 0,61 bis 0,56.

Methode zur Berechnung der Krümmung.

Die Newtonsche Definition der Krümmung als der „reciproke Werth $\left(\frac{1}{r}\right)$ des Radius (r)“ hat bei unserer Methode der optischen Darstellung eine besondere Bedeutung, da einige der wichtigsten Linsen- und Spiegelformeln einfach Ausdrücke enthalten, welche Reciproke von Längen sind, d. h. also Krümmungen bedeuten. Uebrigens ist die neuere Definition der Krümmung als Verhältniss der Winkeländerung pro Längeneinheit der Curve mit derjenigen Newtons identisch; denn wenn sich längs des Bogenelements ds die Richtung um den Betrag $d\vartheta$ ändert, so ist die Krümmung gleich $\frac{d\vartheta}{ds}$; ferner gilt, wenn r den Krümmungsradius bezeichnet $d\vartheta = \frac{ds}{r}$;

also wird die Krümmung $\frac{d\vartheta}{ds} = \frac{\frac{ds}{r}}{ds} = \frac{1}{r}$.

Es giebt jedoch noch eine andere Methode die Krümmung zu messen, welche zwar nur in erster Annäherung einen richtigen Werth liefert, dafür aber bei der Behandlung optischer Probleme ausserordentlich nützlich ist. Gemäss dieser Methode misst man die Ausbauchung eines Bogens über einer Sehne durch den Abstand des Mittelpunkts der Sehne vom Bogen.

Betrachten wir einen Kreisbogen PAP' (Fig. 144) mit dem Centrum O . Quer zu diesem Bogen ziehen wir eine Sehne PP' von beliebiger Länge. Der Durchmesser AB halbirt dieselbe und steht in M senkrecht darauf. Die kurze Linie AM misst den Abstand

der Curve vom Bogen zur Sehne. In continentalen Werken braucht man für die Strecke MA gewöhnlich den Namen „Pfeilhöhe“; da dieser Name vorzuziehen ist und im Allgemeinen unabhängig von der Grösse des Radius gebraucht werden kann, so wollen auch wir ihn hier adoptiren. Bei gegebener Sehne ist die „Pfeilhöhe“ wenigstens in erster Annäherung proportional der Krümmung; denn es gilt laut Construction:

$$MA \cdot MB = PM^2,$$

und falls wir PM als Einheit einführen:

$$MA = \frac{1}{MB} = \frac{1}{2r - MA}.$$

Da aber bei kleinen Aperturen AM klein ist im Vergleich zu $2r$ und somit im Nenner vernachlässigt werden kann, so erhalten wir als erste Annäherung:

$$MA = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{r}.$$

Das Doppelte der Pfeilhöhe stellt numerisch den Werth der Krümmung dar.¹⁾ Der Fehler ist kleiner als 1%, wenn der halbe Centriwinkel POP' etwa 10° beträgt; kleiner als 2%, wenn er 15° umfasst und beträgt noch nicht 5%, wenn der Centriwinkel 25° einschliesst.

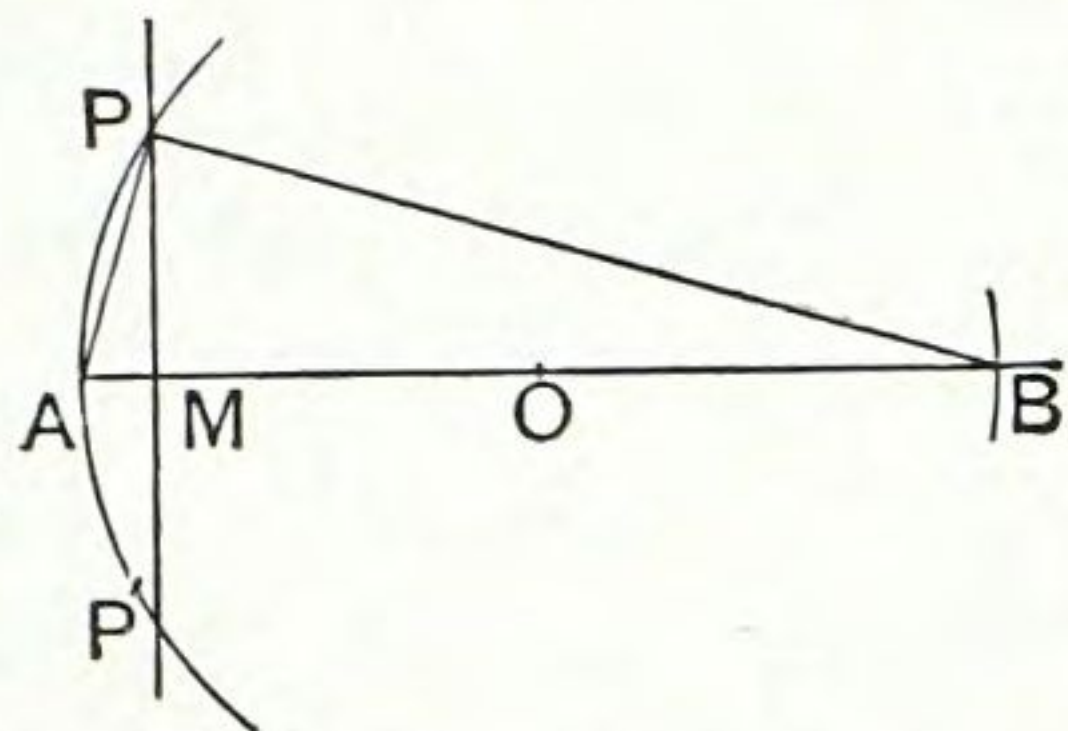


Fig. 144.

Die Methode der Krümmungsberechnung mit Hülfe der Pfeilhöhe ist übrigens insofern gerechtfertigt, als man zur praktischen Messung der Krümmung von Linsen-

flächen und Spiegeln das Sphärometer verwendet, bei dem man die Pfeilhöhe des zu einer gewissen Sehne gehörigen Bogens mittels einer Mikrometerschraube bestimmt und die Grösse des Durchmessers aus dem Contactkreis berechnet, der durch die drei Auflagepunkte des Instrumentes gegeben ist. Der „Linsenmesser“ (lens measurer), welchen die Optiker gebrauchen, um die Krümmung der Brillengläser zu prüfen, ist ein vereinfachtes Sphaerometer, d. h. ein sehr einfaches Mikrometer, welches direct die Pfeilhöhe der zu messenden Curve angiebt, während auf einer Scala der Werth der Krümmung direct abgelesen werden kann.

1) Die Pfeilhöhe ist numerisch gleich der halben Krümmung. Da aber alle Formeln in erster Annäherung homogen und vom ersten Grad sind, soweit die Pfeilhöhe und die Krümmungen ins Spiel kommen, so verschwindet der Factor $\frac{1}{2}$, wenn man von den Pfeilhöhen zu den Krümmungen oder umgekehrt übergeht.

Es bleibt noch übrig, das Vorzeichen der Krümmung zu definieren. Im Falle von Lichtwellen werde das positive Vorzeichen (+) für die Krümmung derjenigen Welle gebraucht, welche nach einem reellen Brennpunkte convergirt; das negative Vorzeichen (—) dagegen für diejenige Welle, welche von einem leuchtenden Punkte divergirt oder von einem virtuellen Brennpunkte herzukommen scheint. Es stimmt diese Bezeichnungsweise mit derjenigen der Optiker und Ophthalmologen überein, welche eine Sammellinse stets als positiv bezeichnen. Eine positive Linse ist also eine solche, welche der sie durchsetzenden ebenen Welle eine positive Krümmung aufdrückt.

Als Einheit der Krümmung, sei es der Wellenoberfläche selbst oder der Oberfläche irgend eines Spiegels oder einer Linse, soll in Uebereinstimmung mit der Bezeichnung in der optischen und ophthalmologischen Praxis die Dioptrie festgesetzt werden, d. h. es soll als Einheit die Krümmung eines Kreises von einem Meter Radius genommen werden. Die Dioptrie, ursprünglich vorgeschlagen von Monoyer als Einheit für die „Stärke“ oder brechende Kraft oder Focalkraft einer Linse, wurde im Jahre 1875 durch den Internationalen medicinischen Congress zu Brüssel adoptirt; ihr grosser Vorzug hat zu ihrer allgemeinen Annahme geführt. Diesem Sprachgebrauch gemäss besitzt also eine Linse von einem Meter Brennweite eine brechende Kraft oder Stärke gleich einer Dioptrie.¹⁾ In anderen Worten heisst das, eine solche Linse drückt einer sie durchschreitenden ebenen Welle eine Krümmung gleich einer Dioptrie auf. Für den hier gemachten Vorschlag, den Gebrauch des Ausdrucks von Focalkräften (focal powers) (d. h. aufgedrückten Wellenkrümmungen) auf die Krümmungen von Kugelflächen im Allgemeinen auszudehnen, ist der Autor verantwortlich.

Benennungen.

Bei der Festsetzung einer Benennung, welche die neue Methode mit umfasst, ist es zweifellos rathsam, dieselbe möglichst den schon vorhandenen und eingeführten Benennungen anzupassen. In den meisten Lehrbüchern der Optik ist das anerkannte Zeichen für die

1) Anmerkung des Uebersetzers: In Deutschland nennt man auf Nagels Vorschlag eine Linse von einem Meter Brennweite eine Meterlinse und sagt: die Stärke einer Meterlinse heisst eine Dioptrie (siehe Müller-Pouillet, 9. Aufl., Bd. II, S. 595).

Brennweite der Buchstabe f und derjenige für den Krümmungsradius r . Andererseits werden in den „Cambridge text-books“ schon seit vielen Jahren die Entfernungen des Object- und Bildpunktes vom Spiegel bzw. der Linse mit den Buchstaben u und v bezeichnet. Jetzt sind es die reciproken Werthe dieser Strecken, welche in die Ausdrücke für die Krümmung der Oberflächen oder der Wellen eingehen. Die Reciproken der vier genannten Grössen wollen wir in Uebereinstimmung hiermit daher mit den Buchstaben F , R , U und V bezeichnen. Der gebräuchlichste Buchstabe für den Brechungsexponenten ist n ; für die „Geschwindigkeits-Constante“, welche gleich dem reciproken Werth von n ist, wollen wir daher den Buchstaben N einführen. Im Folgenden ist eine tabellarische Zusammenstellung der Buchstaben und deren Bedeutung gegeben.

Buchstabe	Bedeutung	Entsprechender Ausdruck in der gebräuchlichen Bezeichnungsweise
F	Focale Krümmung, Stärke oder Focalkraft einer Linse oder eines Spiegels (= Dioptrien, wenn das Meter als Längeneinheit festgesetzt wird)	$\frac{1}{f}$
R	Krümmung der Oberfläche	$\frac{1}{r}$
U	Krümmung der einfallenden Welle, d. h. die Krümmung, welche sie erlangt hat, nachdem sie vom Ausgangspunkt („Einfallsfocus“) bis zum System gegangen ist	$\frac{1}{u}$
V	Krümmung der resultirenden Welle, d. h. die Krümmung, mit welcher die Welle aus der Linse austritt	$\frac{1}{v}$
N	Geschwindigkeits-Constante des Mediums, d. h. die Lichtgeschwindigkeit in dem betreffenden Medium, verglichen mit der als Einheit genommenen Geschwindigkeit des Lichtes in Luft	$\frac{1}{n}$

Berechnung von Krümmungsänderungen.

Ist die Krümmung einer Welle an irgend einem Punkte gleich $R \left(\frac{1}{r} \right)$, so ist die Krümmung $R' \left(\frac{1}{r'} \right)$ an irgend einem anderen Punkte, der in der Entfernung d vom Centrum liegt, gegeben durch die Formel:

$$r' = r \pm d \text{ also } R' = R \cdot \frac{1}{1 \pm Rd} \cdot \cdot \cdot \cdot 1)$$

wo das $+$ Zeichen genommen werden muss, wenn der neue Punkt um die Strecke d weiter vom Centrum entfernt liegt wie der Punkt, für welchen die Krümmung gleich R ist, das $-$ Zeichen dagegen, wenn der neue Punkt um die Strecke d dem Centrum näher liegt. Diese Gleichung ist von Nutzen, wenn man sich mit dicken Linsen oder mit dünnen, in grösserem Abstand von einander befindlichen Linsen beschäftigt.

Formeln für die Brechung an ebenen Flächen.

Ehe wir die Formeln für Linsen aufstellen, wollen wir einige specielle Fälle der Brechung behandeln.

Es werde ein verzögerndes Medium, z. B. Glas betrachtet, welches zur Linken von einer ebenen Fläche SS' (Fig. 145) begrenzt ist; es sei P der Ausgangspunkt von einfallenden Wellen und PM das von P auf die Trennungsfläche SS' gefällte Loth. Die Wellenflächen in aufeinanderfolgenden kleinen Zeitintervallen sind durch Kreisbögen dargestellt. In einem gewissen Moment würde die Oberfläche der Welle, wenn sie in Luft weiter gegangen wäre, die Lage SAS' einnehmen; ihre Krümmung würde also durch ihre Pfeilhöhe AM zu messen sein. Da aber das Medium (Glas) die Welle verzögert, so wird sie anstatt bis A nur bis B vordringen, falls B ein Punkt ist, für welchen $BM = N \cdot AM$ gilt, wo N die Geschwindigkeits-Constante des Glases ist. In Folge der Verzögerung ist die Oberfläche der Welle abgeflacht. Jetzt ziehen wir einen Kreis durch SBS' und suchen dessen Centrum Q . Dann stellt der Bogen SBS' in erster Annäherung die verzögerte Welle dar und wir erhalten die auf SBS' folgenden Wellenoberflächen, indem wir Kreisbögen um Q als Centrum beschreiben. Einem rechts von der brechenden Fläche SS' gelegenen Auge scheinen also die Wellen vom Punkte Q , dem virtuellen Bildpunkte von P , herzukommen. Eigentlich haben die Wellenbögen eine hyperbolische Gestalt; ist aber SS' klein im Vergleich zu PM , so gehen sie in kreisförmige Bögen über.

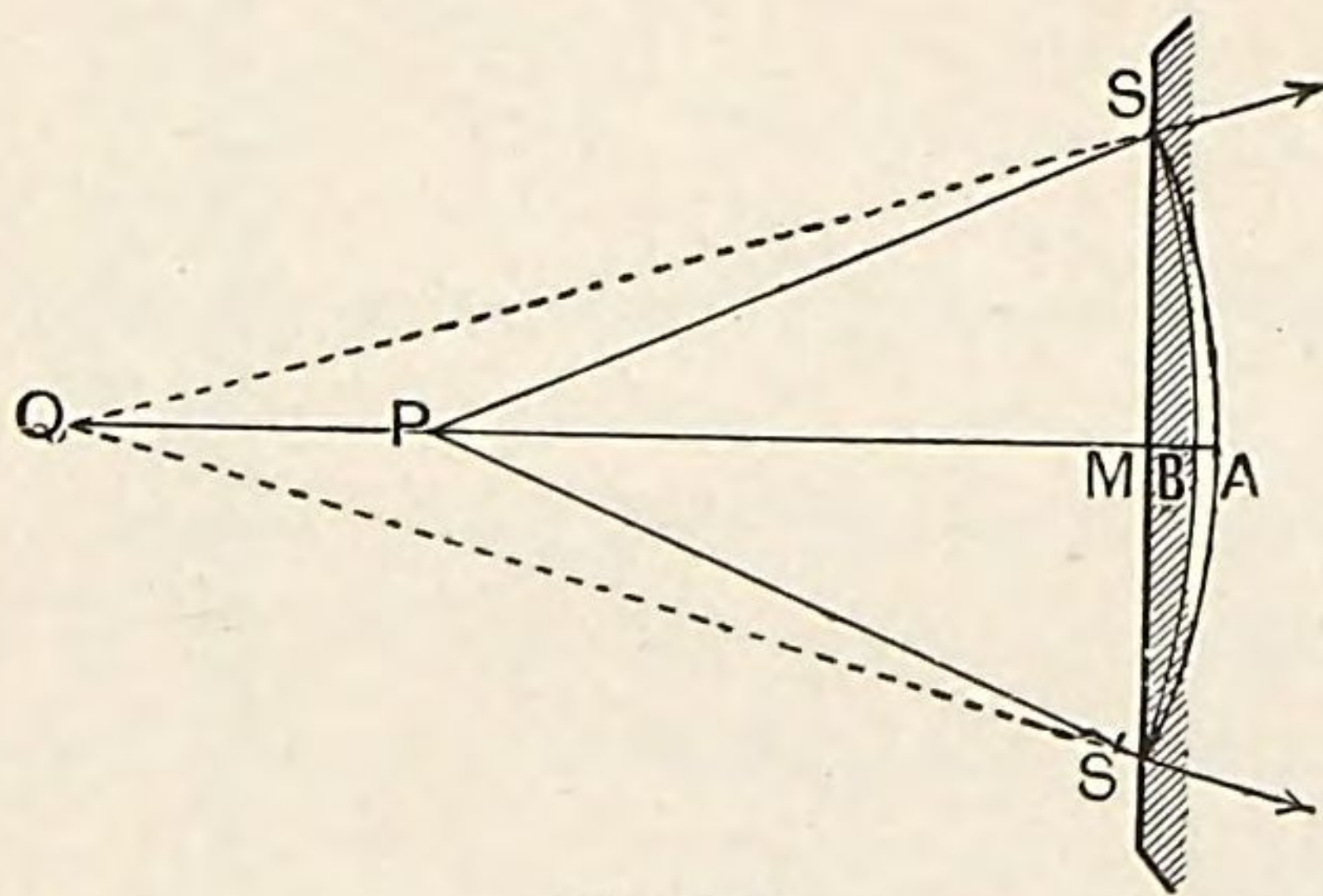


Fig. 145.

Nun ist $AM = U$ und $BM = V$; daher ist die Wirkung der ebenen brechenden Fläche auf die Krümmung der einfallenden Welle (in diesem Falle divergenter Natur) gegeben durch die Formel:

$$V = N \cdot U \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 2)$$

Im obigen Falle, der mit Fig. 19 auf Seite 26 zu vergleichen ist, hat die Welle eine negative Krümmung. Besitzt die einfallende Welle eine positive Krümmung oder Convergenz, so nimmt sie beim Eintreten in ein verzögerndes Medium ebenfalls eine flachere Krümmung an und zielt nach einem Brennpunkt, welcher noch weiter nach rechts gelegen ist als der virtuelle Vereinigungspunkt der eintretenden Welle; dabei hängt das Verhältniss der ursprünglichen und der durch Brechung erworbenen Krümmung wie zuvor einfach von

den relativen Geschwindigkeiten
ab und Formel 2 ist auch hier
noch gültig.

Wir betrachten jetzt die in Luft austretende Welle (Fig. 146), welche von einem im dichteren Medium gelegenen leuchtenden Punkt P herrührt, dessen ebene Begrenzungsfläche SS' und dessen Geschwindigkeits-Constante wieder N sei. Würde die Welle stets im dichteren Medium bleiben, so würde die

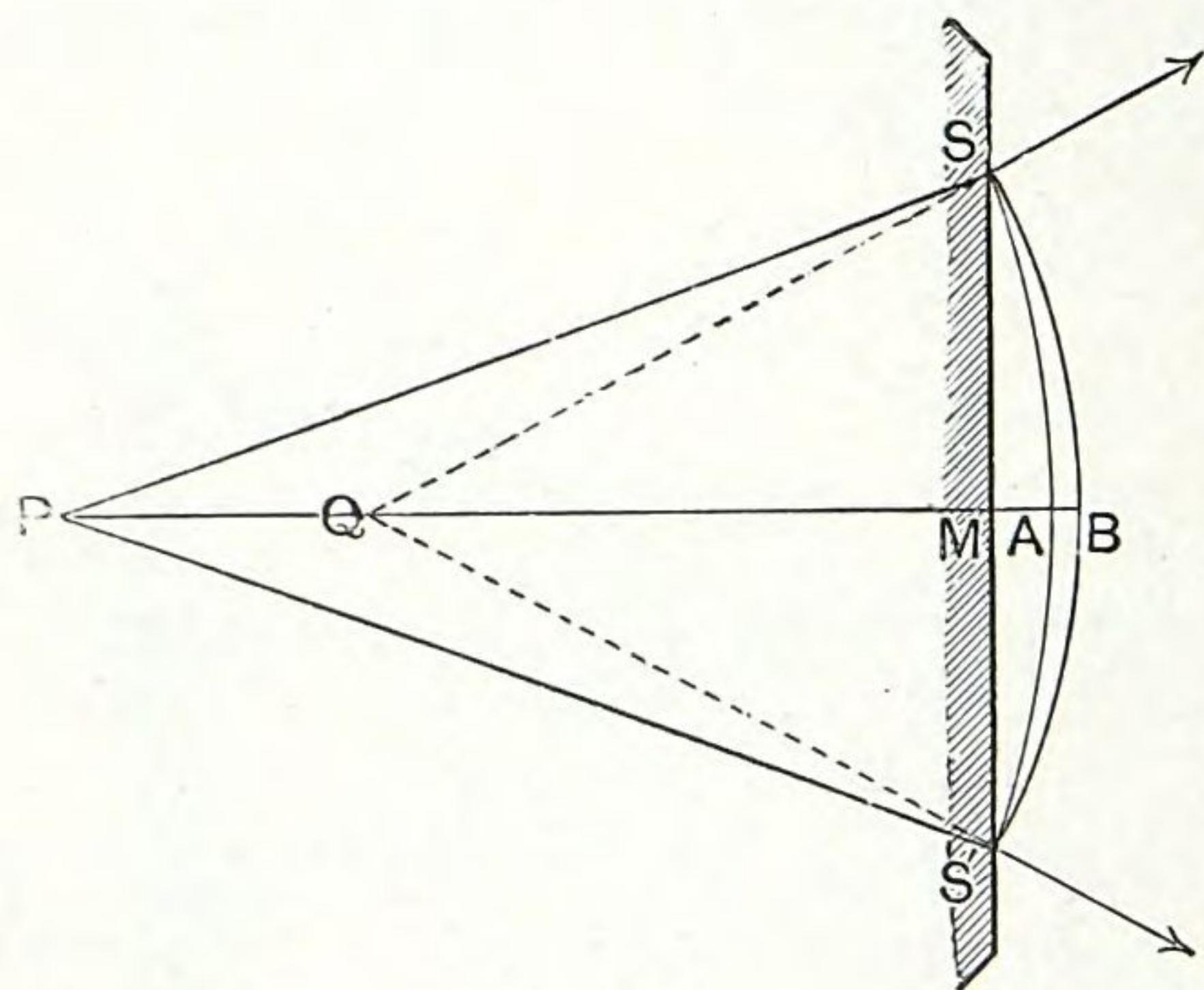


Fig. 146.

Wellenoberfläche bei SS' identisch sein mit dem Kreisbogen SAS' , dessen Centrum P ist; da sie aber beim Austritt aus der Fläche eine Beschleunigung erfährt, so erreicht sie den Punkt B anstatt A und die neue Curve SBS' hat den Punkt Q zum Centrum. In anderen Worten heisst das, die Welle scheint vom virtuellen Brennpunkt Q auszugehen, sodass in Folge der Brechung ihre Krümmung vermehrt ist. Die Pfeilhöhe BM ist dabei im Verhältniss von 1 zu N grösser geworden als AM ; in diesem Falle ist also die Formel:

[illegible]

Der Fall, wo eine Welle mit positiver Krümmung austritt, führt zu derselben Formel. Jedenfalls wird also die Krümmung einer positiven oder negativen Wellenoberfläche beim Austritt aus einem stärker brechenden Medium in ein dünneres Mittel vermehrt.

Trifft eine in Luft fortschreitende ebene Welle auf eine gewölbte Oberfläche eines dichteren Mediums, z. B. Glas, so wird derjenige Theil der Welle, welcher die Oberfläche zuerst erreicht, verzögert, so dass die Wellenoberfläche eine Depression erleidet und demnach beim Eintritt in das zweite Mittel gegen einen Brennpunkt convergirt. Die Beziehung zwischen der hierdurch erhaltenen Focalkrümmung F und derjenigen R der Oberfläche wird durch folgende Formel wiedergegeben:

$$F = R \cdot (1 - N) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 4)$$

Es ist hierbei zu bemerken, dass bei positiver Krümmung der Oberfläche (convex gewölbt gegen die Lichtquelle) auch die aufgedrückte Focalkrümmung positiv ist. Die Formel ist demnach dieselbe für auffallende ebene Wellen, gleichviel, ob die Oberfläche convex oder concav ist, insofern das Vorzeichen von F demjenigen von R folgt. Für den Fall zweier beliebiger Medien mit den zugehörigen Geschwindigkeits-Constanten N_1 und N_2 wird unsere Formel:

$$F = R \cdot \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5)$$

Durcheilt eine ebene Welle ein Medium mit der Geschwindigkeitsconst. N und tritt durch eine gekrümmte Oberfläche in Luft aus, so erhält sie eine Krümmung, deren Vorzeichen demjenigen der brechenden Oberfläche entgegengesetzt ist. Tritt also die nach rechts fortschreitende Welle durch eine positive, convexe Oberfläche aus, deren Krümmungscentrum rechts von ihr gelegen ist, so liegt das Centrum der austretenden gekrümmten Welle links davon; letztere ist also negativ und ihre Focalkrümmung im Vergleich zu derjenigen R der Oberfläche ist gegeben durch die Formel:

$$F = R \left(\frac{N-1}{N} \right) \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 6)$$

Für zwei Medien mit den bezüglichen Geschwindigkeitsconstanten N_1 und N_2 wird unsere Formel wieder wie oben:

$$F = R \frac{N_1 - N_2}{N_1} \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 5^*)$$

welche aber, da jetzt $N_1 < N_2$ ist, für F das entgegengesetzte Vorzeichen von R liefert.

Die Fälle, in denen nicht eine ebene, sondern eine gewölbte Welle die brechende Kugelfläche passirt und eine resultirende Krümmung aufgedrückt erhält, können ohne weitere geometrische Constructionen behandelt werden, indem man das Princip der Super-

position auf Krümmungen anwendet. Betrachten wir z. B. den Fall, dass eine Welle von der anfänglichen Krümmung U ausläuft und in ein Medium mit der Geschwindigkeitsconstante N von solcher Krümmung eintritt, dass die Focalkraft der gekrümmten, brechenden Fläche gleich F ist. Sobald die gekrümmte Welle die brechende Fläche erreicht, begegnen sich zwei Wirkungen: Erstens wird ihre anfängliche Krümmung im Verhältniss der Geschwindigkeiten geändert und zweitens lagert sich über dieselbe die Focalkrümmung der Oberfläche; in Buchstaben heisst das also:

$$V_1 = N U + F_1 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 7)$$

Für eine Welle, welche im Medium die anfängliche Krümmung U besitzt, wird dagegen beim Austritt gelten müssen:

$$V_2 = \frac{1}{N} \cdot U + F_2 \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 8)$$

Falls aber die Welle von einem Medium mit der Geschwindigkeitsconstanten N_1 in ein Medium mit der Constanten N_2 übergeht, gilt einfach:

$$V = \frac{N_2}{N_1} \cdot U + F \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 9)$$

Es ist übrigens auch leicht, irgend einen der möglichen Fälle zu behandeln, ohne zum Princip der Superposition, wie wir es gethan haben, seine Zuflucht zu nehmen.

Linsen - Formeln.

Im Falle von Linsen können wir die einer ebenen Welle beim Eintritt in die erste brechende Linsenfläche aufgedrückte Krümmung F_1 ansehen als anfängliche Krümmung einer Welle, welche nun durch die zweite Fläche austritt. Beim Austritt in Luft wird, wie wir gesehen haben, die Krümmung im Verhältniss von $1:N$ vermehrt; über diese Krümmung lagert sich ausserdem die Focalkrümmung F_2 , welche von der zweiten Linsenfläche herrührt. Daher wird die ganze resultirende Krümmung F , welche einer ebenen Welle von einer dünnen Linse aufgedrückt wird, gegeben durch die Formel:

$$F = \frac{1}{N} \cdot F_1 + F_2$$

oder da

$$F_1 = R_1 (1 - N)$$

und

$$F_2 = - R_2 \cdot \left(\frac{1 - N}{N} \right)$$

Allgemeine Formeln für Linsen.

Das Princip der Superposition giebt ebenfalls ohne Weiteres für alle Linsen, welche auf beiden Seiten von demselben Medium eingeschlossen sind die allgemeine Formel:

$$V = U + F \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 14)$$

oder in Worten: Die resultirende Krümmung ist gleich der algebraischen Summe aus der anfänglichen Krümmung und der durch die Brechung erworbenen Krümmung. Es möge diese Formel wiederum mit der analogen in der gewöhnlichen Schreibweise verglichen werden:

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{f} - \frac{1}{u}.$$

Die Verschiedenheit in Bezug auf das Zeichen des Ausdrucks $\frac{1}{u}$ rührt von der in den beiden Systemen gemachten Annahme her.

Formeln für die Reflexion.

Der ebene Spiegel habe die Oberfläche SMS' (Fig. 147 a. f. S.). Die einfallende Welle würde in einem gewissen Zeitmoment die Oberfläche SAS' haben, wenn sie sich ohne Hinderniss ausbreiten könnte. Der mittlere Theil der Welle, welcher A erreicht hätte, geht aber nach rückwärts bis B , und zwar in der gleichen Zeit, in welcher die Welle ohne Spiegel weiter nach A gegangen wäre; es ist also $MB = MA$. Die Pfeilhöhe BM der resultirenden Krümmung ist von gleicher Grösse, wie die Pfeilhöhe AM der anfänglichen Krümmung, hat aber das entgegengesetzte Vorzeichen, es ist also:

$$V = -U \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 15)$$

Dabei sind zwei Fälle zu unterscheiden; entweder der Spiegel ist convex oder concav. Sie sind beide in den Fig. 13 und 14 auf S. 19 getrennt dargestellt, in denen beide Male die einfallende Welle eben ist. Betrachten wir jetzt die ebene Welle in Fig. 148, welche sich nach einer gewissen Zeit bis SAS' ausgebreitet hätte, falls der gekrümmte Spiegel nicht vorhanden wäre. Der mittlere Theil wird

und dem Brechungsindex n , welche von Flächen mit den Radien r_1 und r_2 gebildet wird:

$$f = \frac{r_1 r_2 n - r_2 (n-1) d}{(n-1) [n(r_2 - r_1) + d(n-1)]},$$

während bei der nach der Gaussischen Theorie abgeleiteten Formel im Zähler das relativ kleine Glied $r, (n-1) d$ fehlt.

aber in Folge des Spiegels bei M zurückgeworfen und schreitet nach rückwärts bis B in der gleichen Zeit, in der er ohne Spiegel nach A gelangt wäre. Daraus folgt:

$$BM = AM$$

oder

$$BA = 2 AM.$$

AM misst aber die Krümmung des Spiegels, während BA die Krümmung darstellt, welche der ebenen Welle in Folge der Spiegelung aufgedrückt worden ist. Es folgt also:

$$F = 2R \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 16)$$

gemäss der gebräuchlichen Bezeichnung ist dagegen:

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{r},$$

oder

$$f = \frac{r}{2}.$$

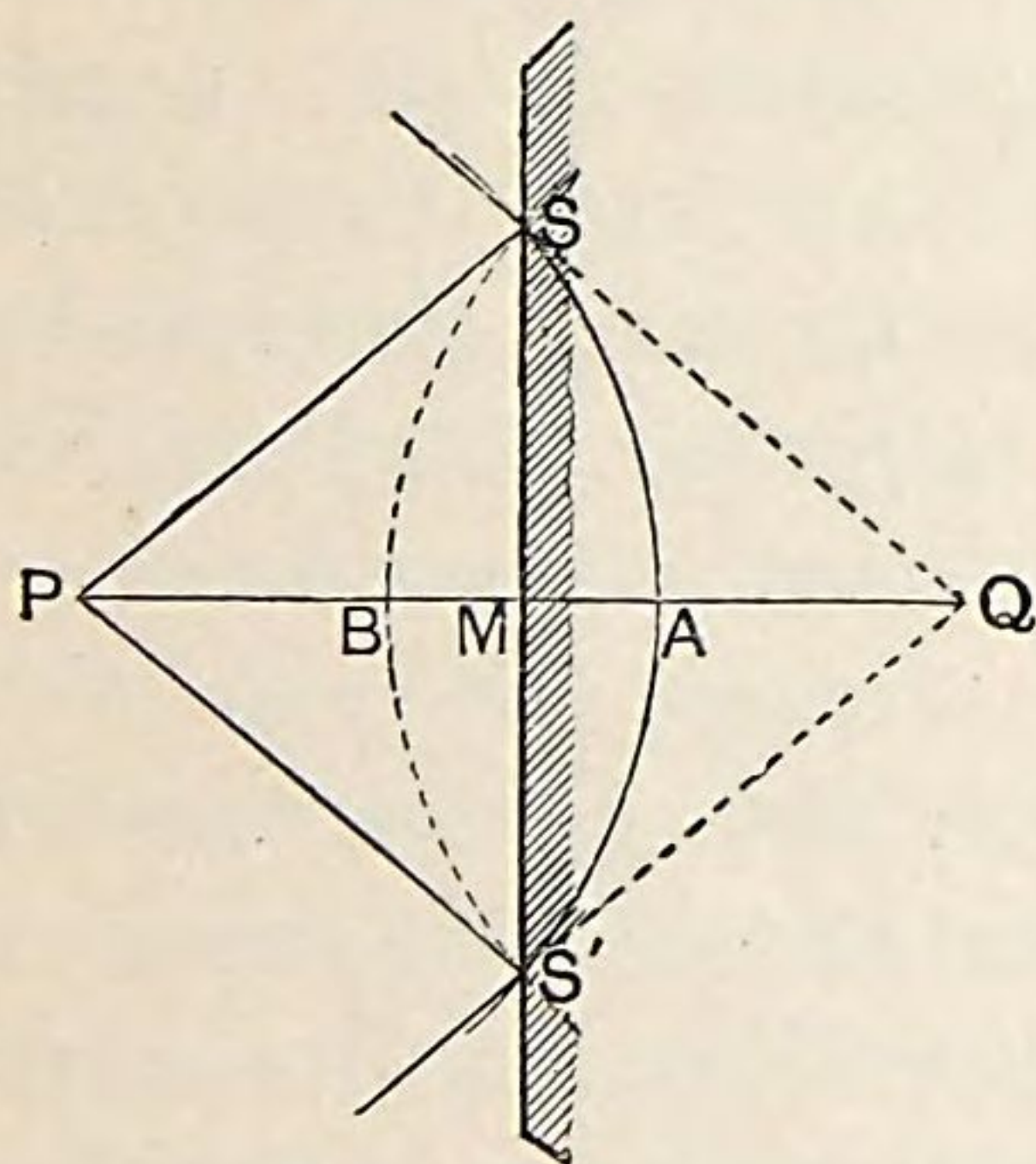


Fig. 147.

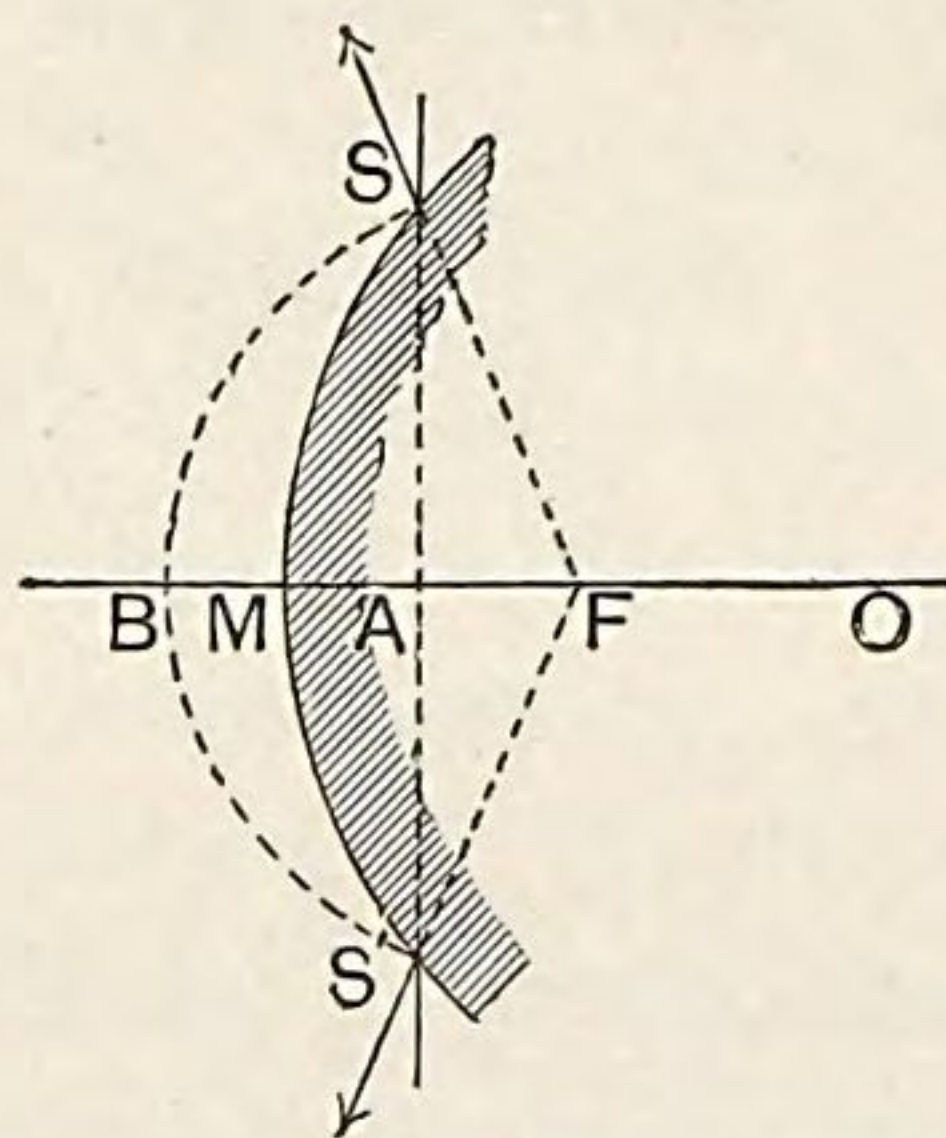


Fig. 148.

Es ist ebenso leicht die Formel aufzustellen, welche gilt, wenn eine gekrümmte Welle auf einen gekrümmten Spiegel fällt. Das Princip der Superposition führt ohne Weiteres zu einer allgemeinen Formel, indem es die Summe der beiden Wirkungen des Spiegels auf die Welle umfasst; der Spiegel kehrt erstens die anfängliche Krümmung um und drückt zweitens eine neue Focalkrümmung auf. In Buchstaben ausgedrückt erhalten wir also:

$$V = -U + F \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad . \quad 17)$$

Um die Richtung eines gebrochenen Strahlenbüschels mittels des Wellenprincips zu finden, bedient man sich am besten der von Ampère modificirten Huyghensschen Construction (Fig. 149). In derselben Figur ist gleichzeitig die Dispersion dargestellt, welche in Folge der Differenz der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes für verschiedene Farben gleichzeitig mit der Brechung hervorgebracht wird.

Während der Zeit, in welcher Licht irgend einer Farbe in Luft den Weg von 12 cm zurücklegt, würde rothes Licht im Glas 7,5 cm und violettes Licht etwa 7 cm zurücklegen. Die Geschwindigkeitsconstante im Glas dieser Art ist also 0,625 für rothe und 0,583 für violette Wellen. Es sei EF die ebene Oberfläche des Glases und AO die Richtung des auffallenden Lichtes. Betrachten wir den Theil der Wellenoberfläche, welcher bei O ankommt. Laut dem Huyghensschen Princip kann diese Stelle als neues Wellencentrum aufgefasst werden, von dem aus sich neue Wellen kreisförmig ihrer Geschwindigkeit gemäss ausbreiten. Darum ziehen wir um O als

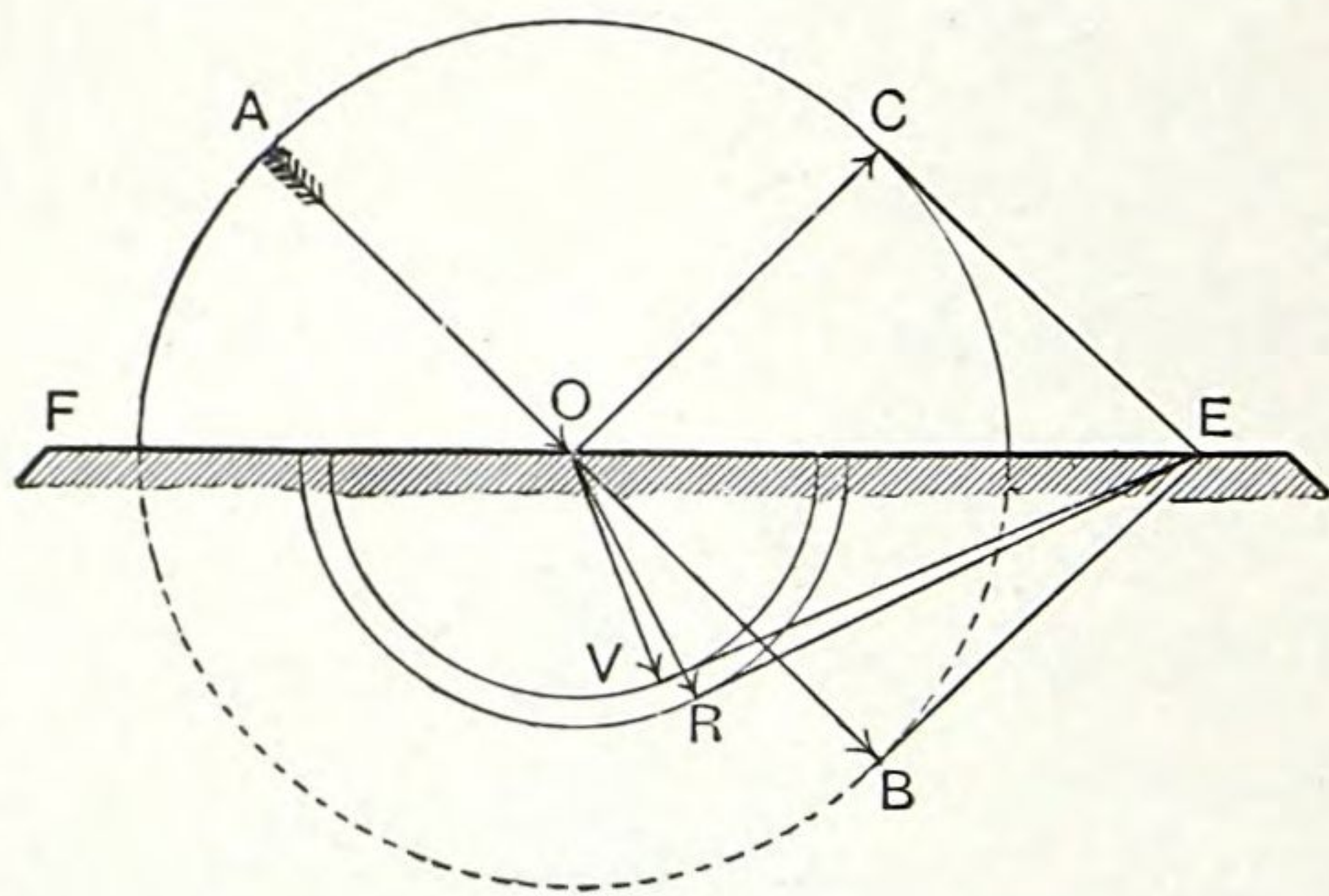


Fig. 149.

Centrum eine Reihe von Kreisen, einen mit dem Radius Eins, um zu sehen, wie weit die Welle in einer gewissen Zeit fortgeschritten wäre, wenn sie sich ungehindert in Luft hätte ausbreiten können; einen andern (es genügt ein Halbkreis) mit dem Radius 0,625, um zu sehen, wie weit die rothe Welle im Glas fortgeschritten

wäre und einen dritten Halbkreis mit dem Radius 0,583, um zu zeigen, wie weit sich in derselben Zeit die violette Welle im Glas ausgebreitet hätte. Jetzt verlängern wir OA bis B und ziehen in B eine Tangente, welche die Glasoberfläche in E trifft. Von E ziehen wir sodann, um die Wellenoberflächen zu markiren, ebensoviele Tangenten als Kreise vorhanden sind. Dann ist EC die Wellenfront desjenigen Lichtantheils, welcher in Richtung OC zurückgeworfen worden ist, ER ist Wellenoberfläche des in Richtung OR gebrochenen rothen Lichtes und EV stellt die Wellenoberfläche des violetten Lichtes dar, welches eine Ablenkung in Richtung OV erlitten hat.

Anhang zur zweiten Vorlesung.

Anomale Brechung und Dispersion.

Auf Seite 48 ist erwähnt worden, dass das durch ein Prisma hervorgebrachte Spectrum insofern von dem Beugungsspectrum abweicht, als die Ablenkung der verschiedenen Wellen nicht proportional ihrer Grösse ist, dass vielmehr die rothen und gelben Wellen an dem einen Ende des Spectrums relativ eng zusammengedrängt sind, während die blauen und violetten Wellen am anderen Ende unverhältnissmässig weit auseinander gezogen sind. Dabei ist die Dispersion verschieden für die verschieden brechenden Substanzen. Thatsächlich dispergiren kaum zwei Substanzen das Licht in ganz gleicher Weise, wenn auch im Allgemeinen wenigstens die Farbenordnung dieselbe ist und meistens die Substanzen insofern mit einander übereinstimmen, als sie alle das rothe Ende des Spectrums unverhältnissmässig zusammendrängen. Es giebt jedoch einige wenige Substanzen, welche sich ganz abweichend verhalten und bei denen die Dispersion abnorm verläuft, insofern sie die violetten Wellen weniger ablenken als die rothen. Dieses Phänomen der „anormalen Dispersion“ wurde zuerst im Jahre 1840 durch Fox Talbot¹⁾ an einigen Krystallen von Chrom-Bioxalat und Kalium-Bioxalat entdeckt. Die Farbenordnung in den Spectren einiger dieser Krystalle war eine so anomale, dass Talbot sie nicht anders erklären konnte, als „durch die Vermuthung, dass das Spectrum, nachdem es sich bis zu einer gewissen Strecke entwickelt hat, Halt macht und wieder in sich selbst zurückkehrt.“

Im Jahre 1861 fand Le Roux, dass Joddampf, welcher übrigens nur rothe und blaue Strahlen hindurchlässt, die rothen Strahlen mehr verzögert als die blauen und somit ein umgekehrtes Spectrum liefert. Im Jahre 1870 beobachtete Christiansen, dass

1) Siehe Taits „Light“ S. 158.

eine alkoholische Lösung von Fuchsin zwar eine reguläre Brechung für die Wellen von Roth bis Gelb zeigt (es wird also Gelb stärker gebrochen als Orange und Orange stärker als Roth), dass es dagegen Grün ausserordentlich stark absorbirt und alle übrigen gewöhnlich „brechbarer“ genannten Farben weniger ablenkt als Roth! In diesem Falle kehrt buchstäblich das Spectrum in sich selbst zurück. Unsere Kenntnisse von der anomalen Dispersion wurden namentlich von Kundt gefördert und erweitert. Im Besonderen entdeckte Kundt, dass einige durch elektrische Zerstäubung in die Form ausserordentlich dünner Prismen gebrachten Metalle ebenfalls anomale Dispersion zeigen.

Bei der Discussion dieser Erscheinung ist zuerst zu bemerken, dass die anomale Dispersion nur bei stark gefärbten, stark absorbirenden Substanzen auftritt.¹⁾ Die anomale Dispersion ist also eine Eigenschaft derjenigen Substanzen, die in Folge ihrer molekularen Beschaffenheit Wellen gewisser Länge sehr stark absorbiren, sich dagegen für Wellen von anderer Länge wie durchsichtige Medien verhalten, sodass sie im Spectrum einen oder mehrere Absorptionsstreifen aufweisen. In Folge seiner Eigenschaft, einen starken Absorptionsstreifen bei Grün zu besitzen, d. h. Grün stärker als alle anderen Farben zu verschlucken, übt Anilinroth z. B. einen störenden Einfluss auf alle Wellen kürzerer Länge aus und bewirkt, dass diese anstatt stärker weniger stark abgelenkt werden. Diese bemerkenswerthen Erscheinungen hängen zweifellos mit der Art und Weise zusammen, in welcher die Moleküle der ponderablen Materie dem Lichtaether verbunden sind. Keine der von Cauchy, Ketteler und Anderen aufgestellten Dispersionsformeln geben eine vollständige Rechenschaft von diesen Erscheinungen.

Im Jahre 1872 betrachtete Lord Rayleigh das Problem der Lichtbrechung in opaken Körpern und gab im *Philosophical Magazine* (Bd. 44 S. 322) eine sinnreiche Deutung.

1) Anmerkung des Uebersetzers: Es dürfte nicht ohne Interesse sein zu erwähnen, dass Kundt schon vor Christiansen auf Grund theoretischer Ueberlegungen bemüht war, die anomale Dispersion an allen Körpern mit sogen. Oberflächenfarben nachzuweisen. Als Christiansen seine Epoche machende Entdeckung publicirt hatte, nahm Kundt seine früheren Versuche sofort wieder auf und zeigte, dass alle Körper mit Oberflächenfarben auch starke anomale Farbenzerstreuung besitzen. Die Versuche mit den dünnen, durch Zerstäubung erhaltenen Metallprismen datiren erst aus neuerer Zeit (*Wied. Ann.* Bd. 34, 1888).

Im Jahre 1893 publicirte ferner von Helmholtz (Wied. Ann. Bd. 48, S. 389) eine bemerkenswerthe Studie über die normale und anomale Dispersion, in welcher er von der Maxwellschen elektromagnetischen Lichttheorie ausgeht.¹⁾

1) Anmerkung des Uebersetzers: v. Helmholtz hatte schon im Jahre 1874 (Monatsber. d. Berl. Akad. u. Pogg. Ann. **154**, 582 bis 596, 1875) von der elastischen Lichttheorie ausgehend eine Lehre der anomalen Dispersion aufgestellt, welche auf dem Mitschwingen der Moleküle mit den Aethertheilchen beruhte. Die damals erhaltene Formel giebt den Verlauf der anomalen Dispersion beim Fuchsin etc. vollständig wieder. Nach v. Helmholtz haben besonders Lommel und Ketteler in ähnlichem Sinne weiter gearbeitet; sie nehmen aber in Bezug auf die Wechselwirkung zwischen den Aether- und Körpermolekülen ein anderes Gesetz an. In der neueren Arbeit gelang es Helmholtz auf Grund der elektromagnetischen Lichttheorie unter Voraussetzung elektrisch geladener Atome der körperlichen Moleküle sowohl die regelmässige Dispersion bei den durchsichtigen, als auch die anomale Dispersion der eine gewisse Farbe stark absorbirenden Medien abzuleiten. Auch widerspricht seiner Theorie die von Kundt direct bewiesene Thatsache nicht, dass manche Metalle das Licht schneller fortpflanzen, als der freie Aether und darum in Prismenform eine Ablenkung nach der brechenden Kante zu bewirken. Ja selbst die entladende Wirkung, welche die ultravioletten Strahlen auf elektrisch geladene Atome ausüben, wird zu erklären versucht.

Anhang zur dritten Vorlesung.

Die elastische Theorie des Lichtes.

Auf Seite 25 ist gesagt worden, dass Lichtwellen in dichterem Medien langsamer fortschreiten und auf Seite 83 ist gezeigt worden, dass sich in einem doppeltbrechenden Krystall die Wellen in zwei Wellenzüge spalten, die mit verschiedener Geschwindigkeit weiter-schreiten. Es möge hier etwas näher auf die Frage betreffs der Ge-schwindigkeit der Fortpflanzung der Lichtwellen eingegangen werden. Betrachtet man den Newtonschen Satz als fundamental, dass die Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Welle gleich ist der Quadrat-wurzel aus der Elasticität des Mediums, getheilt durch seine Dichtig-keit (in Buchstaben ausgedrückt $v = \sqrt{\frac{E}{D}}$), dann ist man zur An-nahme der Coexistenz verschiedener Geschwindigkeiten gezwungen unter der Voraussetzung, dass Verschiebungen in verschiedener Rich-tung entweder eine verschiedene Elasticität oder aber eine ver-schiedene Dichtigkeit erzeugen. Da aber der Aether das die Licht-wellen vermittelnde Medium ist, so muss man beim Durchgang des Lichtes durch die Krystalle gewisse Annahmen über den in den betreffenden Krystallen vorhandenen Lichtäther machen. Nehmen wir mit Kirchhoff an, dass der Aether sich wie ein incompressibler, homogener, elastischer, fester Körper verhält, so kann man die ge-wöhnliche Elasticitätstheorie fester Körper auf den Aether anwenden. Lange Zeit galt diese „elastische“ Lichttheorie für richtig und sie hat demgemäss durch viele Forscher eine gründliche mathematische Behandlung erfahren, unter denen nur Green, Fresnel, Mac-Cullagh, F. Neumann, Cauchy, Kirchhoff und Voigt genannt seien.

Bei dieser Annahme sind die Aethertheilchen im Krystalle in verschiedenen Richtungen lediglich verschieden angeordnet, und zwar symmetrisch in Bezug auf drei rechtwinklige Axen, sodass in Folge der Anwesenheit der krystallinischen Materie die Eigenschaften

des Aethers als Lichtmedium modificirt werden. Hierbei sind zwei Annahmen möglich: erstens kann man mit Fresnel annehmen, dass die Gegenwart der krystallinen Materie die Dichtigkeit des Aethers modificirt, ohne seine Elasticität zu ändern, oder aber mit F. Neumann und Mac-Cullagh, dass die Gegenwart der Krystalltheilchen die Elasticität nach verschiedenen Richtungen ändert, ohne seine Dichtigkeit zu beeinflussen. In jedem Falle wird man zu Gleichungen geführt, welche die Erscheinungen der Doppelbrechung und Polarisation vollkommen wiedergeben. Nur folgender Unterschied tritt auf: Nach Fresnel finden die Verschiebungen senkrecht zur sogenannten „Polarisationsebene“ statt; nach F. Neumann gehen sie in derselben vor sich.

Um auch die Dispersion des Lichtes zu erklären, muss die „elastische“ Lichttheorie eine Wechselwirkung zwischen den körperlichen Molekülen und den Atomen des Aethers in Betracht ziehen. (Vergl. den Anhang zur zweiten Vorlesung, speciell die Anmerkung auf S. 203.) Dadurch, dass die Körpertheilchen den Aether belasten, durch ihn in Mitschwingung versetzt werden und so die Aetherenergie verkleinern, verzögern sie auch die Strecke, welche der Wellenzug zurücklegen kann. Da über die Relation zwischen den materiellen Theilchen und den Aethertheilchen, welche man bei dieser Theorie voraussetzen muss, wenig bekannt ist, so ist ziemlich viel Spielraum für die zu machenden Annahmen vorhanden. Sellmeier, Helmholtz, Kelvin, Lommel, Ketteler u. A. haben über die Art des Mitschwingens verschiedene Annahmen gemacht. (Siehe übrigens den Anhang zur zweiten Vorlesung.)

Jetzt sind alle rein mechanischen Theorien vollkommen zurückgedrängt durch die elektro-magnetische Lichttheorie von Maxwell, welche, wie wir im Anhang zur fünften Vorlesung sehen werden, auf den experimentellen Untersuchungen und Speculationen von Faraday aufgebaut ist.

Hier wollen wir uns nur noch kurz mit dem Ausdruck „Ebene der Polarisation“ beschäftigen. Dieser Ausdruck, welcher von verschiedenen Schriftstellern verschieden gebraucht wird, soll die Ebene vorstellen, in Bezug auf welche die polaren Eigenschaften einer Welle beschrieben werden können. Nothwendig muss dieselbe jene Linie enthalten, längs welcher sich die Welle fortpflanzt; es liegt also der Strahl jedenfalls in der Polarisationsebene. Was aber die Lage der Ebene rund um den Strahl herum betrifft, so ist ihre Festlegung mit Bezug auf die polaren Eigenschaften der Welle eine

rein conventionelle Sache. Herschel giebt in seinem Artikel „Light“ (S. 506 der Encyclopedia Metropolitana) folgende Definition der Polarisationsebene: „Die Ebene der Polarisation eines polarisirten Strahles ist die Ebene, in welcher derselbe reflectirt sein muss, damit er sich den Charakter der Polarisation erwirbt; oder in anderen Worten jene durch den Strahl gelegte Ebene, senkrecht zu welcher der Strahl von einem durchsichtigen Medium nicht unter dem polarisirten Winkel reflectirt werden kann; oder schliesslich jene Ebene, in welcher, falls die Achse der Turmalinplatte senkrecht zum Strahl gelegen ist, vom Strahl nichts hindurchgelassen wird.“

Denken wir an das Nicolsche Prisma (Fig. 72, S. 78), so liegt die durch Herschels Definition festgelegte Ebene der Polarisation des austretenden Lichtes parallel zur längeren Diagonale der Endfläche, während die Schwingungen in senkrechter Richtung dazu ausgeführt werden. Um in diesen Vorlesungen Weitschweifigkeiten zu vermeiden, spricht der Autor von jener Ebene, in welcher die Schwingungen ausgeführt werden, als von der Ebene, in welcher die Welle polarisirt ist.

Anhang zur vierten Vorlesung.

Tafel für Wellenlängen und zugehörige Schwingungszahlen.

Name der Linie	Element	Wellenlänge in Milliontel Millimeter ($\mu\mu$)	Schwingungszahl in Billionen pro Secunde
Längste Wellen nach Rubens und Nichols	—	24 000	12,5 ($\times 10^{12}$)
Längste Wellen nach Langley	—	15 000	20,0
" " " Paschen	—	9 450	31,7
Ψ_2 }	—	2 700	111
Ψ_1 }	—	1 240	242
Φ_2	—	1 200	250
Φ_1	—	899,04	333,7
Y {	—	898,65	334,0
X_4	—	880,61	340,8
X_3	—	866,14	346,2
X_2	—	854,18	351,3
X_1	—	849,7	353,3
Z	—	822,64	364,5
A	O	759,4	395,2
B	O	686,74	436,5
C	H	656,30	457,2
D_1	Na	589,61	508,8
D_2	Na	589,02	509,1
D_3	He	587,60	510,5
E_1 {	Fe	527,05	569,2
	Ca	527,04	569,2
E_2	Fe	526,97	569,3
b_1	Mg	518,38	578,9
b_2	Mg	517,29	580,0
b_3 {	Fe	516,92	580,4
	Fe	516,91	580,4
b_4 {	Fe	516,77	580,5
	Mg	516,75	580,5
F	H	486,15	617,1
G {	Fe	430,81	696,3
	Ca	430,79	696,4
h	H	410,18	731,3
H	Ca	396,86	756,0
K	Ca	393,38	762,7
L	Fe	382,06	785,1
M {	Fe	372,78	804,6
	Fe	372,71	804,9

Name der Linie	Element	Wellenlänge in Milliontel Millimeter ($\mu\mu$)	Schwingungszahl in Billionen pro Secunde
<i>N</i>	Fe	358,13	837,7
<i>O</i>	Fe	344,11	871,8
<i>P</i>	Fe	336,13	892,6
<i>Q</i>	Fe	328,69	912,6
<i>R</i>	Ca	318,14	942,9
	Ca	317,94	943,5
<i>r</i>	Fe	314,46	954,1
<i>S</i> ₁ <i>S</i> ₂	Fe	310,08	967,4
	Fe	310,04	967,6
	Fe	310,01	967,7
<i>s</i>	Fe	304,77	984,5
<i>T</i>	Fe	302,12	993,0
	Fe	302,07	993,3
<i>t</i>	Fe	299,45	1002,0
<i>U</i>	Fe	294,80	1017,6
Grenze nach Miller, erhalten mittels Photographie	—	202,0	1485,1
Grenze nach Stokes, erhalten durch Fluorescenz	—	185,0	1621,6
Grenze nach Schumann, er- halten im luftleeren Raume	—	100	3000

Anmerkung des Uebersetzers: Neuerdings ist es den Herren Rubens und Nichols gelungen, noch längere Wärmewellen im Zirkonbrenner nachzuweisen, welche die beträchtliche Länge von etwa 50 000 $\mu\mu$ oder $\frac{1}{20}$ Millimeter besitzen. Sie benutzen die aus der Dispersionstheorie gefolgerte und experimentell erwiesene Thatsache, dass auch die durchsichtigen Substanzen wie die anomal dispergirenden, absorbirenden Stoffe einen oder mehrere Absorptionsstreifen aufweisen, die im ultravioletten und ultrarothem Theile des Spectrums gelegen sind. Die stark absorbirten, z. B. langen ultrarothem Wellen werden aber auch stark reflectirt (metallisch gespiegelt), während von den übrigen auffallenden Wellen nur wenige Procente gespiegelt werden. Nach viermaliger Reflexion an solchen Substanzen sind somit nur noch die stark absorbirten und daher metallisch reflectirten Strahlen im Lichtgemisch vorhanden; ihre Wellenlänge wird mit Hülfe eines Drahtgitters und Bolometers gemessen. Durch mehrfache Reflexion an Sylvin konnten ganz neuerdings sogar Wellen von nahe $\frac{1}{16}$ mm Länge festgestellt werden. (Siehe Verhandlungen der Physik. Gesellschaft zu Berlin März 1898.) Diese langen Sylvin-Wellen gehen natürlich nicht durch Sylvin hindurch, wohl aber durch die meisten, für die gewöhnlichen Lichtstrahlen undurchsichtigen Substanzen, wie Paraffin, Wachs etc.

Anhang zur fünften Vorlesung.

Die elektro-magnetische Lichttheorie.

Während des ersten Viertels unseres Jahrhunderts hatte die Huyghenssche Wellenlehre des Lichtes die ältere Corpusculartheorie siegreich verdrängt. Young, Fresnel, Arago, Biot, Scherard und Airy bauten die Gesetze der physikalischen Optik auf der fast unerschütterlichen Basis der Undulationstheorie auf, Brewster als den alleinigen Vertreter der alten Newtonschen materiellen Lichttheorie zurücklassend. Keiner aber von denen, welche der Wellenlehre des Lichtes zum Siege verhalfen, konnte eine Aufklärung der Natur jener Wellenbewegung geben. Wenn Licht eine wellenförmige Bewegung ist, so muss nothwendig ein Stoff vorhanden sein, welcher der Träger der Lichtwellen ist: Wegen Unkenntniss dieses Stoffes nannte man ihn vorläufig den „Aether“. Was aber die Natur des Aethers selbst oder seine besonderen Bewegungen anlangt, welche als Wellen sich fortpflanzen, darüber war nichts zu erfahren; nur wusste man, dass der Aether sich wie eine incompressible Flüssigkeit oder ein fester Körper von ausserordentlicher Dünne und grosser Elasticität verhielt und dass die Aetherwellen solche transversaler Natur waren.

Im Jahre 1845 entdeckte nun Faraday die merkwürdige Thatsache, dass der Magnet eine besondere Einwirkung auf das Licht ausübt: Dass nämlich die Ebene der Polarisation eines linear polarisirten Strahlenbüschels gedreht wird, wenn das Büschel in einem magnetischen Felde verläuft.

Nachdem einmal die Existenz einer Beziehung zwischen Licht und Magnetismus festgestellt war, suchte Faraday nach anderen Beziehungen und sah zu, ob nicht auch ein elektrostatischer Druck das polarisirte Licht beeinflusste oder ob das an einem polirten Magnetpole gespiegelte Licht eine Veränderung zeigte; in beiden Fällen war das Resultat ein negatives.

Schon im Jahre 1846 veröffentlichte Faraday im Philosophical Magazine einige „Gedanken über Strahlenvibrationen“ (Thoughts on

Ray Vibrations), in denen er ausführte, dass Strahlung jeder Art (die Lichtstrahlung nicht ausgeschlossen) lediglich eine sehr schnelle Vibration der Kraftlinien sei. „Stellen wir uns“, so schreibt er, „zwei Körper A und B vor, welche von einander eine gewisse Entfernung haben und sich gegenseitig beeinflussen, also durch Kraftlinien verbunden sind und verwenden wir unsere Aufmerksamkeit auf eine bestimmte Resultante der Kraft, welche eine zum Raum unveränderliche Richtung besitzt. Bewegt sich jetzt einer der Körper nur im geringsten Grade nach rechts oder links oder verschieben sich seine Kräfte innerhalb seiner Masse (keiner der beiden Fälle ist schwer zu verwirklichen wenn A und B elektrische oder magnetische Körper sind), dann wird eine einer seitlichen Bewegung äquivalente Wirkung auch in der Resultante Platz greifen, auf welche wir unsere Aufmerksamkeit geheftet haben. Entweder sie wird an Kraft zunehmen, während die benachbarten Resultanten abnehmen, oder ihre Kraft wird abnehmen, wenn jene wachsen Die Fortpflanzung der Lichtstrahlung und wahrscheinlich die jeder strahlenden Wirkung braucht eine gewisse Zeit; soll also eine Vibration der Kraftlinien für die Erscheinung der Strahlung verantwortlich gemacht werden, so muss man nothwendig annehmen, dass auch die Fortpflanzung einer solchen Vibration Zeit braucht . . . Der Annahme dieser Eigenschaft der Kraftlinien, welche die vermeintliche grosse Elasticitätskraft des Aethers darstellt, stehen keine Schwierigkeiten entgegen. Vielmehr ist hier die Frage lediglich die, ob die Kraftlinien in ihrer Wirkung auch träge genug sind, um sie an Stelle des Aethers treten zu lassen, wenn man die Zeit betrachtet, welche für die Fortpflanzung der Strahlung auf experimentellem Wege gefunden worden ist.“

Im Jahre 1864 schrieb Clerk Maxwell in einer Abhandlung über „Eine dynamische Theorie des elektromagnetischen Feldes“ in den Philosophical Transactions:

„Die Idee von der Fortpflanzung transversaler, magnetischer Störungen ist deutlich von Professor Faraday in seinen „Gedanken über Strahlenvibrationen“ ausgesprochen worden. Die von ihm vorgeschlagene elektro-magnetische Lichttheorie stimmt der Sache nach mit dem überein, was ich in diesem Journal entwickelt habe, abgesehen davon, dass im Jahre 1846 noch keine Anhaltspunkte vorhanden waren, um die Geschwindigkeit der Fortpflanzung zu berechnen“. Maxwell leitet dann neue Gleichungen ab, welche die Beziehung zwischen den elektrischen und magnetischen Verschiebungen im Medium und ausserdem die Kräfte feststellen,

welche durch jene Verschiebungen entstehen. Er acceptirt nicht nur die Idee von Faraday, dass eine sich bewegende elektrische Ladung (z. B. ein in Bewegung befindlicher elektrisch geladener Körper) magnetisch wie ein elektrischer Strom wirkt — eine Annahme, welche zu jener Zeit durch kein einziges Experiment getragen wurde — sondern er geht noch weiter und behauptet, dass auch eine magnetische Kraft hervorgebracht wird, wenn in einem dielektrischen Medium eine elektrische Verschiebung hervorgebracht oder aufgehoben wird. Er findet, dass bei der Anwendung magnetischer Messmethoden die Einheit der Elektrizität einen anderen Werth erhält, als wenn man sich rein elektrischer Messmethoden bedient. Er erkannte, dass die Beziehung zwischen diesen beiden Einheiten abhängig von der „elektrischen Elasticität“ des Mediums und nichts anderes als eine „Geschwindigkeit“ sei; diese Geschwindigkeit aber sollte die nämliche sein, mit welcher sich eine elektromagnetische Störung im Raume fortpflanzt. Diese Geschwindigkeit war schon vorher von Weber und Kohlrausch als das Verhältniss der Einheiten und zwar zu $3,19 \cdot 10^{10}$ Centimeter pro Secunde bestimmt worden. Gleichfalls war die Geschwindigkeit der scheinbaren Ausbreitung einer elektrischen Störung längs eines Drahtes schon vorher, wenn auch nur roh, durch Wheatstone experimentell von gleicher Grössenordnung (in Wirklichkeit etwas grösser) gefunden worden. Sich auf Webers Resultat beziehend fährt Maxwell weiter fort: „Diese Geschwindigkeit ist so nahe gleich derjenigen des Lichtes, dass wir allen Grund zu der Annahme haben, dass auch das Licht selbst (einschliesslich aller anderen Strahlenarten) eine elektromagnetische Störung ist, welche durch das elektro-magnetische Feld in Form von Wellen gemäss den elektro-magnetischen Gesetzen fortgepflanzt wird. Ist dem wirklich so, so ersieht man aus der Uebereinstimmung zwischen der Elasticität des Mediums, wie sie einerseits aus den sehr schnellen Lichtschwingungen gefolgert und andererseits aus den langsamen Vorgängen bei elektrischen Erscheinungen gefunden wird, wie vollkommen und regelmässig die elastischen Eigenschaften des Aethers sein müssen, falls er nicht in einer Materie eingebettet, die dichter als Luft ist. Behält der Aether denselben Charakter der Elasticität auch in dichten, durchsichtigen Medien bei, so muss auch das Quadrat des Brechungsindex gleich sein dem Product aus der specifischen dielektrischen und magnetischen Capacität. Da die elektrisch leitenden Medien solche Strahlungen schnell absorbiren, müssen sie im Allgemeinen auch undurchsichtig sein.“ Maxwell

versuchte diese zwei Schlussfolgerungen selbst zu bestätigen und deckte eine scheinbare Ausnahme auf im Falle von Elektrolyten, welche leiten und trotzdem durchsichtig sind. Nach Maxwells Theorie muss jede elektro-magnetische Welle aus zwei Arten von Verschiebungen bestehen, welche beide transversal zur Fortpflanzungsrichtung gerichtet sind und auf einander senkrecht stehen; die eine ist eine elektrische, die andere eine magnetische Verschiebung. In dieser Gestalt vereinigt die Maxwellsche Theorie die sich widersprechenden Ansichten von Fresnel und Neumann, betreffend die Beziehung zwischen der Richtung der Schwingungen und der „Ebene der Polarisation“. Wir wissen jetzt, dass die elektrischen Verschiebungen zur Polarisationssebene senkrecht stehen und mit den Fresnelschen Schwingungen übereinstimmen, während die magnetischen Verschiebungen in der Ebene der Polarisation vor sich gehen, wie es die Theorie von Neumann verlangt. Als Maxwell im Jahre 1874 sein Buch „Treatise on Magnetism and Electricity“ publicirte, hatte er schon eine weitere Bestätigung seiner Theorie angestrebt, und zwar durch eine neue Bestimmung des Verhältnisses der beiden Einheiten. Während der nächsten 10 Jahre waren die englischen Physiker bemüht, Anwendungen der Maxwellschen Theorie ausfindig zu machen und ihre Richtigkeit an einzelnen Fällen zu prüfen. Lord Rayleigh zeigte, dass die elektromagnetische Lichttheorie viel leichter als die elastische Theorie zu den Gleichungen der Doppelbrechung führt und eine Erklärung der Zerstreuung des Lichtes (scattering of light) durch kleine Partikelchen (wie beim Himmelsblau) gestattet. Fitzgerald wandte sie auf die Probleme der Reflexion und Brechung an. J. J. Thomson unternahm eine neue Bestimmung des Verhältnisses beider elektrischen Einheiten. Ayrton und Perry verfolgten denselben Zweck mit Hülfe einer neuen Methode. Dieselben beiden Beobachter verificirten auch die von der Theorie verlangte Beziehung zwischen den optischen und dielektrischen Eigenschaften im Falle von Gasen, und untersuchten die beim Eis und Ebonit auftretenden Anomalien. Poynting und Heaviside schlossen unabhängig von einander aus Maxwells Theorie, dass die Energie eines elektrischen Stromes im umgebenden Medium und nicht entlang dem leitenden Draht fließt. Hopkinson untersuchte die Beziehung zwischen dem Brechungsindex einer ganzen Anzahl von Substanzen und deren Dielektricitätsconstanten (dielectric inductivity) und fand einige bemerkenswerthe Abweichungen zwischen den beobachteten und den aus der Theorie hergeleiteten Werthen. Lodge stellte eine Anzahl

wichtiger Betrachtungen hierzu an und fertigte Modelle, um Maxwells Ideen zu illustrieren. Der Autor untersuchte den Turmalin in Bezug auf seine Undurchsichtigkeit und Leitungsfähigkeit und fand in Uebereinstimmung mit Maxwells Ansichten, dass die Leitungsfähigkeit von Quecksilber- und Kupferjodid zunimmt, wenn sie auf eine Temperatur erhitzt werden, bei der ihre Undurchsichtigkeit gegen Licht plötzlich vermehrt wird. Weit wichtiger aber sind die auf experimentellem Wege unabhängig von Maxwells Theorie im Jahre 1876 und 1877 von Kerr entdeckten Beziehungen zwischen Licht und Magnetismus einerseits und zwischen Licht und elektrostatischem Druck andererseits, Wirkungen, welche Faraday vermuthet hatte, aber nicht nachweisen konnte. Schliesslich hat Fitzgerald im Jahre 1879 und 1883 Mittel vorgeschlagen, um elektro-magnetische Wellen im Aether zu erzeugen.

Um das Jahr 1884 herum hatten alle englischen Physiker die Maxwellsche Lichttheorie angenommen mit Ausnahme vielleicht von Lord Kelvin, welcher damals gerade eine eigene Sprungfedertheorie (springshell theory) des Aethers als Stütze für die Richtigkeit der „elastischen“ Lichttheorie ausgearbeitet hatte. Drei Jahre später gehörte auch Lord Kelvin zu den Anhängern der Maxwellschen Theorie.

Auf dem Continent war Maxwells Lehre zu dieser Zeit noch wenig anerkannt. In Frankreich war sie gänzlich unbekannt, bis Mascart und Joubert einen Bericht über dieselbe in ihrer „Lehre von der Elektrizität“ gaben. In Deutschland war sie nicht ganz so vollständig vernachlässigt.¹⁾ Wenigstens hatte von Helmholtz sich sehr früh schon mit Maxwells Lehre vertraut gemacht und eine neue Theorie der dielektrischen Wirkung auf ähnlichen Grundzügen gebildet. Später (1893) wandte er die elektro-magnetische Lichttheorie an, um die anomale Brechung und Dispersion zu erklären (siehe Anhang zur dritten Vorlesung). von Helmholtz war es auch, welcher Hertz darauf aufmerksam machte, dass eine Beziehung zwischen den elektro-magnetischen Kräften und der dielektrischen Polarisation herzustellen möglich wäre. Boltzmann hat ebenfalls versucht, Maxwells Lehre mit Hinsicht auf die Beziehung zwischen den optischen und dielektrischen Eigenschaften durchsichtiger Medien

1) Anmerkung des Uebersetzers: Die deutsche Uebersetzung des Maxwellschen Buches: „Treatise on Magnetism and Electricity“ durch Dr. B. Weinstein erschien schon im Jahre 1884.

zu verificiren. Wie wenig man aber mit der Maxwellschen Lehre vertraut war, geht aus folgenden Worten hervor, welche Boltzmann im Jahre 1891 schrieb: „Die Maxwellsche Lehre ist so diametral entgegengesetzt den Ideen, mit denen wir vertraut sind, dass wir erst alle unsere bisherigen Ansichten von der Natur und der Wirkung elektrischer Kräfte über Bord werfen müssen, ehe wir in ihre Pforten eintreten können.“

Als Lodge im Jahre 1886 die Theorie der Blitzableiter studirte, stellte er eine grosse Anzahl von Versuchen über die Entladung kleiner Condensatoren an, welche ihn zur Beobachtung elektrischer Oscillationen und der Fortpflanzung elektrischer Wellen in Drähten¹⁾ führte. Als Hertz das ihm von Helmholtz gestellte Problem behandelte, untersuchte er auch den Einfluss, welchen nichtleitende Medien auf die Ausbreitung elektrischer Funken ausüben. Schon im März 1888 war es ihm nicht nur geglückt, mittels der oben beschriebenen Apparate (Fig. 104 Seite 148) elektrische Oscillationen und elektrische Wellen zu erzeugen, sondern auch nachzuweisen, dass diese Wellen wie gewöhnliche Lichtwellen reflectirt und gebrochen werden können.

Die Publication der Hertzschen Arbeiten wirkte unmittelbar und verblüffend. Jenen Physikern des Continents, welche die Maxwellsche Lehre bis dahin ignorirt hatten oder die von den englischen Physikern erbrachten Beweise nicht kannten, erschienen die

1) Anmerkung des Uebersetzers: Schon im Jahre 1871 entdeckte Herr von Bezold, als er die Flaschenentladung mittels der vom Funken erzeugten Lichtenbergschen Staubfiguren und die Verzweigung solcher oscillirenden Entladungsströme studirte („Untersuchungen über die elektrische Entladung“, Pogg. Ann. 140, S. 54, 1871), eine wellenartige Fortpflanzung dieser Schwingungen in Drähten und es gelang ihm sogar, die Reflexion und Interferenz elektrischer Wellen in einem frei endigenden Draht nachzuweisen. Es ist heute kaum verständlich, dass diese wichtigen Ergebnisse unbeachtet bleiben konnten und nicht damals schon als Hülfsmittel zur Prüfung der Maxwell-Faradayschen Anschauungen weiter verfolgt wurden. Erst 16 Jahre später wurde Hertz zu ganz ähnlichen Versuchen wie von Bezold geführt, als er mit einem Paar sogenannter Riesscher Spiralen experimentirte. In der That war der Versuch, welcher ihn zu der Ueberzeugung vom Vorhandensein **regelmässiger, elektrischer Schwingungen** von ausserordentlich geringer Periode führte, von v. Bezold schon damals in ganz ähnlicher Weise angestellt worden. Vertraut mit den Faraday-Maxwellschen Anschauungen gelang es Hertz dann Schlag auf Schlag die Ausbreitung dieser elektrischen Schwingungen im freien Raume, ihre Reflexion, Brechung und Polarisation nachzuweisen und ihre Fortpflanzungsgeschwindigkeit bzw. ihre Wellenlänge zu messen.

Hertz'schen Resultate wie eine Offenbarung. Das ganze wissenschaftliche Europa beschäftigte sich mit der Erzeugung elektrischer Wellen, als ob es galt die verlorene Zeit wieder einzuholen.

Die Offenbarung wirkte um so nachdrücklicher auf die, welche sich mit den Faradayschen und Maxwell'schen Ideen nicht vertraut gemacht hatten; war es doch für sie gleichbedeutend damit, alle bisherigen elektrischen Theorien und somit auch die nun unhaltbar gewordene Annahme von Fernkräften aufzugeben. Um so freudiger wurden die Hertz'schen Resultate in England von jenen willkommen geheissen, welche mit der Maxwell'schen Lehre schon vertraut waren; sahen sie doch in ihnen die krönenden Beweise für eine Theorie, welche sie schon aus anderen Gründen als richtig acceptirt hatten. Ja, es hatte, um mich der Worte Oliver Lodges zu bedienen, die elektrische Wissenschaft im Jahre 1888 sich definitiv der Domäne optischer Erscheinungen bemächtigt und war eine souveräne Wissenschaft geworden.

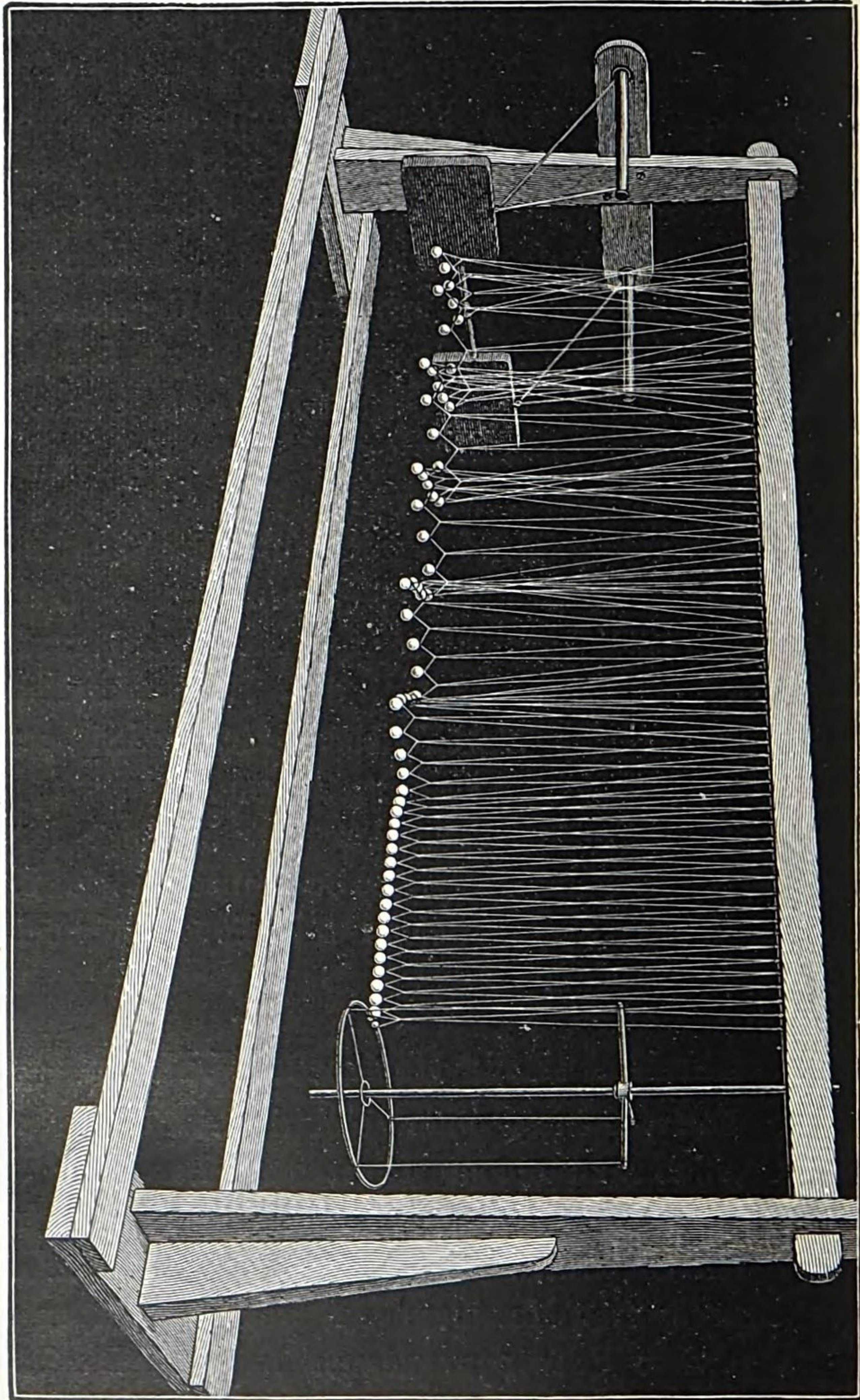
Seit 1888 ist viel geleistet worden, um die vollkommene Analogie zwischen den elektrischen Wellen und den als Licht empfundenen Aetherwellen experimentell noch vollständiger darzuthun. Man kann jetzt mit Sicherheit behaupten, dass alle bekannten physikalischen Eigenschaften der gewöhnlichen Lichtwellen entsprechend auch den längeren, unsichtbaren, durch rein elektrische Mittel erzeugten Hertz'schen Wellen zukommen. Nur in Folge der grösseren Wellenlänge durchdringen sie viele Substanzen, wie Steine und Mauern, Nebel und Wolken, welche für die gewöhnlichen Lichtwellen undurchsichtig sind.

Ein Modell für Hertz'sche Wellen.

Um die Fortpflanzung einer elektrischen Welle von einem Hertz'schen Oscillator zu einem Hertz'schen Resonator auf mechanischem Wege zu veranschaulichen, hat der Autor das in Fig. 150 abgebildete Modell construirt. In diesem Modell besteht der „Oscillator“ aus einer schweren Messingmasse, welche an Fäden aufgehängt ist und eine gewisse Schwingungsdauer besitzt. Der „Resonator“ ist ein am anderen Ende des Apparates mittels dreier Fäden aufgehängter Messingkreis. Beide werden durch Verlängerung oder Verkürzung der Fäden so justirt, dass sie synchron schwingen, d. h. die gleiche Schwingungsperiode haben. Um das Zwischenmedium und den Durchgang der Energie in Gestalt von Wellen zu markiren, sind „Resonator“ und „Analysator“ durch eine Reihe von unter

sich verkuppelten Pendeln verbunden, von denen jedes aus einer Bleikugel besteht und an einem V-förmigen Faden aufgehängt ist. Die verschiedenen V's greifen in einander über, sodass keine Kugel schwingen kann, ohne einen Theil ihrer Bewegung ihrer nächsten

Fig. 150.



Nachbarkugel mitzutheilen. Zieht man den „Oscillator“ zur Seite und lässt ihn dann los, so erregt er eine transversale Welle, welche sich längs der Kugelreihe fortpflanzt und mit den Augen bequem verfolgt werden kann; sobald sie den Resonator am anderen Ende erreicht, setzt sie auch ihn in Bewegung.

Anhang zur sechsten Vorlesung.

Andere Arten unsichtbaren Lichtes.

Nachdem Röntgen jene wunderbaren Strahlen entdeckt hatte, welche seinen Namen tragen, war es nur natürlich die Frage aufzuwerfen, ob es ausser den Lenardschen Kathodenstrahlen und den Röntgenschen X-Strahlen nicht noch andere Strahlen giebt, welche wenigstens in angenähertem Maasse die Fähigkeit haben, undurchsichtige Körper zu durchdringen.

Bisher ist die bis aufs Aeusserste luftleer gemachte „Vacuumröhre“ unter dem Einfluss elektrischer Entladungen die einzige bekannte Quelle für die genannten Strahlen. Viele haben vermuthet, dass die Röntgenstrahlen auch durch elektrische Funken in der freien Luft hervorgebracht werden könnten, insofern solche Funken ebenfalls in schwarzes Papier eingehüllte photographische Platten belichten und Bilder von Münzen und anderen metallenen Gegenständen auf den Platten erzeugen, welche mit letzteren in Berührung stehen. Diese Bilder verdanken jedoch ihre Entstehung der directen elektrischen Wirkung. Sie werden nicht hervorgebracht, wenn man ein Blatt aus Aluminium derart zwischen Gegenstand und Lichtquelle legt, dass jede directe elektrische Wirkung ausgeschlossen ist.

Weder im Sonnenlicht, noch im Licht des elektrischen Kohlenbogens scheinen die Röntgenstrahlen zu existiren; denn in keiner dieser Strahlungsquellen konnten Strahlen nachgewiesen werden, welche eine durch Aluminiumblech vor directer Belichtung geschützte photographische Platte belichten.

Dennoch giebt es einige Lichtarten, welche ähnlich den Röntgenstrahlen durch Aluminium oder schwarzes Papier hindurch photographische Wirkungen ausüben. Dahin gehören die folgenden Strahlenarten:

Becquerels Strahlen. Von Becquerel und mir ist unabhängig beobachtet worden, dass einige Salze des Uranmetalls (z. B. Urannitrat) unsichtbare Strahlen aussenden, welche fähig sind Alu-

minium zu durchdringen und auf einer photographischen Platte von den dazwischen gelegten metallischen Gegenständen Schatten zu entwerfen.

Es scheint diese Wirkung auf einer unsichtbaren Phosphorescenz dauernder Natur zu beruhen. Gerade wie die Leuchtfarben nach ihrer einmaligen Belichtung für viele Stunden sichtbares Licht ausstrahlen, ebenso vermögen die Uransalze monatelang unsichtbare Strahlen auszusenden. Man bezeichnet daher diese Erscheinung als „Hyper-Phosphorescenz“. Uebrigens giebt auch die gewöhnliche Leuchtfarbe, welche nach einigen Tagen keine Spur sichtbaren Lichtes mehr aussendet, doch noch monatelang im Dunkeln eine unsichtbare Strahlung von sich, welche photographische Platten zu belichten im Stande ist.

Einige Zeit nach dieser Entdeckung beobachtete Becquerel, dass auch das Uranmetall als solches die Kraft der „Hyper-Phosphorescenz“ besitzt, und zwar in weit höherem Maasse als die Salze dieses Metalls.

Seitdem wurden auch noch andere Substanzen untersucht. Herr Charles Henry hat gefunden, dass Zinksulfat unter dem Einfluss der Röntgenstrahlen seinerseits Strahlen aussendet, welche undurchsichtige Körper durchdringen; dasselbe beobachtete Niewenglowski beim Calciumsulfat. Andererseits fand Herr Troost, dass die dem Sonnenlicht ausgesetzt gewesene hexagonale Blende auch durch Cartonpapier hindurch photographisch wirksam ist.

Becquerels Strahlen besitzen ferner, ähnlich dem gewöhnlichen, ultravioletten Licht und den Röntgenstrahlen, die Fähigkeit, elektrisch geladene Körper zu entladen. Ferner werden sie gleich den Lenardstrahlen durch die Luft absorbirt, während sie die verschiedensten Substanzen, wie Wasser, Wachs, Schwefel, alle Metalle, Glas etc. zu durchdringen vermögen. Uebrigens sind diese Resultate auf elektrischem Wege mit Hülfe des Elektroskops gefunden worden.

Becquerel prüfte auch die Reflexionsfähigkeit seiner Strahlen, indem er eine Lamelle des wirksamen Uransulfates auf eine Trockenplatte legte, die nur zur Hälfte mit einem polirten Stahlspiegel (mit seiner spiegelnden Fläche nach unten) bedeckt war. Nach einer Exposition von 55 Stunden war die bedeckte Hälfte stärker belichtet als die nichtbedeckte. Auch durch Benutzung eines halbkugelförmigen Spiegels aus Zinn konnte er die Verstärkung der Wirkung in Folge von Reflexion nachweisen. Becquerel zeigte ausserdem, dass diese Strahlen gebrochen und polarisirt werden können.

Wie erwähnt übertrifft metallisches Uran alle anderen Substanzen in Bezug auf die Stärke der Emission dieser Strahlen, welche im Dunkeln von ihm monatelang ausgesandt werden. Woher dieser Vorrath an Energie stammt, entzieht sich vorläufig noch unserer Kenntniss.

Der Autor stellte einige Experimente an, um die durchdringende Kraft dieser Strahlen mit der der Röntgenstrahlen zu vergleichen. Uebrigens scheint kein Zweifel darüber zu sein, dass Uranstrahlen eine Art ultravioletten Lichtes sind; ihre Wellenlänge ist sicher kleiner als 10 Mikro-Centimeter und ihre Schwingungszahl demnach grösser als 3000 Billionen in der Secunde.

Ganz kürzlich hat Dr. W. J. Russel gefunden, dass auch frisch gereinigtes, metallisches Zink und noch verschiedene andere Substanzen, unter diesen einige Holz- und Papierarten, ähnliche Wirkungen ausüben.

Phosphor-Licht. Der Autor hat die durchdringende Kraft einiger bekannten Lichtarten untersucht. Das schwache Licht, welches Phosphor beim Oxydiren in feuchter Luft aussendet, enthält gleichfalls unsichtbare Strahlen, welche durch schwarzes Papier und Celluloid, nicht aber durch Aluminium hindurchgehen. Aehnliches gilt von den unsichtbaren, in der Flamme des Schwefelkohlenstoffs enthaltenen Strahlen.

Licht der Glühkäfer. Dr. Dawson Turner hat gefunden, dass auch das von den Glühkäfern ausgesandte Licht photographische Strahlen enthält, welche durch Aluminium hindurchgehen. In Japan andererseits hat Dr. Muraoko die Strahlen untersucht, welche von der Feuerfliege (Johanniskäfer) ausgesendet werden. Er fand, dass diese auch nach dem Durchgang durch ein Papierblatt oder durch ein Kupferblech photographisch wirksam sind. Diese Strahlen können ebenfalls gespiegelt und demnach wohl auch gebrochen und polarisirt werden. Muraoko benutzte zu seinen Experimenten über 1000 Leuchtkäfer, die er in einem engen Kasten dicht über der photographischen Platte eingeschlossen hatte.

E. Wiedemanns Strahlen. Professor Eilhard Wiedemann beschrieb im Jahre 1895 einige (von ihm „Entladungsstrahlen“ genannte) Strahlen, welche in den Vacuumröhren entstehen, wenn man durch sie schnell wechselnde elektrische Oscillationen sendet. Sie haben die Eigenschaft bei gewissen chemisch präparirten Substanzen, z. B. bei dem einen kleinen Procentsatz Mangansulfat enthaltenden Calciumsulfat „Thermoluminescenz“ zu erregen; d. h. also, dass die

von diesen Strahlen belichteten Substanzen erst dann Licht aussenden, nachdem sie erhitzt worden sind. Sie entstehen bei geringerer Luftverdünnung, als sie zur Erzeugung der Kathodenstrahlen nothwendig ist, und werden von allen Stellen der Funkenentladung, am stärksten jedoch in der Nähe der Kathode ausgestrahlt. Unter dem Einfluss elektrischer Schwingungen werden sie in einigen Fällen selbst bei einem Druck von einer halben Atmosphäre, und zwar sowohl vom Gase selbst wie von den Wandungen der Röhre ausgesandt, noch ehe irgend welches sichtbare Licht zu bemerken ist. Ihre Ablenkung durch den Magneten konnte nicht festgestellt werden. Ihre Kraft, die Körper zu durchdringen, steht zumal bei den unter höheren Drucken erzeugten Strahlen nahe im umgekehrten Verhältniss zur Dichte des Körpers.

Neue Arten von Kathodenstrahlen. Der Autor hat kürzlich zwei neue Arten von Kathodenstrahlen gefunden. Die eine Strahlenart (parakathodische Strahlen) entstehen beim Auftreffen der gewöhnlichen Kathodenstrahlen auf eine Antikathode wie bei den „Focusröhren“. Ist das Vacuum niedrig, so werden von der Antikathode nach allen Richtungen in ziemlich gleicher Intensität Strahlen ausgesendet, welche den gewöhnlichen Kathodenstrahlen sehr ähnlich sind. Sie können elektrostatisch und magnetisch abgelenkt werden und entwerfen von den Objecten Schatten auf der Glaswand. Ist das Vacuum hoch genug, um die Röntgenstrahlen zu erzeugen, so werden auch gleichzeitig einige „parakathodische“ Strahlen hervor gebracht, welche die Glaskugel auf einer schief begrenzten (obliquely limited) Region wie in Fig. 128 S. 178 zur Fluorescenz bringen.

Die andere Strahlenart (diakathodische Strahlen) entsteht, wenn man die gewöhnlichen Kathodenstrahlen auf ein Stück Drahtgaze oder auf eine Drahtspirale fallen lässt, welche an sich negativ geladen sind. Die gewöhnlichen Kathodenstrahlen gehen nicht durch die Maschen der Gaze hindurch; statt derselben geht ein Büschel bläulicher Strahlen durch, welche sich insofern von den gewöhnlichen Kathodenstrahlen unterscheiden, als sie vom Magneten nicht abgelenkt werden. Diese Strahlen bringen ebenfalls da, wo sie die Glaswand treffen, Fluorescenz hervor und werfen von den Objecten Schatten auf der Glaswand. Die Fluorescenz ist aber von anderer Art, denn sogenanntes Natronglas giebt an Stelle der gewöhnlichen goldgrünen Färbung dunkelorange farbene Fluorescenz. Dieses mit dem Spectroskop untersuchte Licht zeigt die charakteristische D-Linie des Natriums.

Goldsteinsche Strahlen. Herr Goldstein hat ebenfalls einige Strahlen beschrieben, welche mit den oben erwähnten eng verwandt sind. Verwendet man als Kathode eine durchbohrte Scheibe, so werden einige blaue Strahlen erzeugt, welche von der Kathode nach rückwärts strömen.¹⁾

1) Anmerkung des Uebersetzers: Diese von Goldstein schon vor Jahren beobachteten neuen Kathodenstrahlen (Canalstrahlen) scheinen mit den vom Autor gefundenen diakathodischen Strahlen insofern identisch zu sein, als auch Goldstein als ihr charakteristisches Merkmal die Eigenschaft angiebt, vom Magneten nicht abgelenkt zu werden. Goldstein entdeckte sie, als er die Kathodenstrahlen auf eine die Röhre quer abschliessende Aluminiumscheibe mit einer Oeffnung (Canal) fallen liess. Wie schon auf S. 174 erwähnt worden ist, hat neuerdings W. Wien die magnetische Ablenkbarkeit auch der Goldsteinschen Canalstrahlen nachgewiesen und gezeigt, dass sie mit der entgegengesetzten Elektrizität behaftet sind, wie die gewöhnlichen Kathodenstrahlen. Gerade in letzter Zeit sind viele interessante Untersuchungen von Wiechert, J. J. Thomson, Kaufmann, Des-Coudres, Lenard, Aschkinass, W. Wien u. A. über die Kathodenstrahlen angestellt worden, welche mit Sicherheit schliessen lassen, dass die Kathodenstrahlen aus geschleuderten, elektrostatisch geladenen Theilchen eines vorläufig noch unbekannten Stoffes gebildet werden, die mit nahe der Lichtgeschwindigkeit sich fortpflanzen. Interessant ist die von Des-Coudres theoretisch gefolgerte und experimentell bestätigte Erscheinung, dass die Geschwindigkeit der negativ geladenen Kathodenstrahlen vergrößert oder verkleinert wird, je nachdem man senkrecht zum Strahlenbüschel eine positiv oder negativ geladene Platte bringt, welche die Kathodenstrahltheilchen gleichsam anzieht oder abstösst.

Register.

- Abney, Kapitän W., über farbenempfindliche Platten 120.
Absolut schwarzer Körper 134.
Absorption des Lichtes durch gefärbte Medien 57.
— und anomale Dispersion 201.
— durch schwarze Oberflächen 134.
— von Röntgenstrahlen 164.
Actinische Wellen 105.
Aether, der 68.
Ahrenscher Polarisator 79 Anm.
Aladins Wunderlampe 118.
Albertotypie 121.
Alexandrit, Farben des Krystalls, genannt 54.
Aluminium, Durchsichtigkeit von, gegen Röntgen-Strahlen 164.
— -Blatt, Gebrauch desselben in Elektroskopen 181.
Amethyst, optische Eigenschaften des 87.
Ampères Construction 200.
Amplitude der Wellenbewegung 7.
Analysator 74.
Analyse des Lichtes durch Prismen oder Gitter 45, 48.
Animatograph 64.
Anomale Brechung und Dispersion 201.
Anschütz' bewegliche Bilder 64.
Antikathode (Kinematograph) 178.
Antipyrin, optische Eigenschaften des 98.
Anzeiger der elektrischen Wellen (Resonator) 148.
Aschkinass, sein Resonator 154.
Auge, die Empfindlichkeit vom, gegen Helligkeitsunterschiede 13.
— als optischer Apparat 33.
Auge, das, des Codfisches im polarisirten Licht 99.
Ayrton und Perry, über das Verhältniss der elektrischen Einheiten 217.
Balmainsche Leuchtfarbe 116.
Becquerel, Prof. Heinrich, seine Entdeckung der Uransalzstrahlen 184, 217.
Benhams Farbenkreisel 62.
Beugungsgitter, Spectrum erzeugt durch das 47, 48.
Bezold, Prof. W. von, elektrische Wellen in Drähten 147, 214.
Bidwell, Shelford, über Ermüdung der Retina 62.
— über seltsame Farbeffecte 65.
Bild eines leuchtenden Punktes 17.
Bilderzeugung 22.
Bilder im Auge sind umgekehrt 34.
Blau und Gelb geben Weiss 58, 96.
Blau des Himmels, Theorie vom 212.
Bogenlampe, Emission des Lichtes der 71.
— Bilder der Kohlen der 21.
Bologneser Leuchtstein 116.
— Tropfen, opt. Eigenschaften der 99.
Bolometer, sein Gebrauch 130.
Boltzmann, Prof. Ludwig v., über Elektro-Optik 213.
Bose, Prof. J. Chunder, über Polarisation der elektrischen Wellen 157.
— sein Apparat zum Studium elektrischer Wellen 157.
Boyle, Hon. Robert, über Phosphorescenz des Diamanten 116.
Branlys Eisenfeilicht-Resonator 154.

- Brechung des Lichtes 26.
 Brennglas 32.
 Brennpunkt, reeller u. virtueller 20, 30.
 Brodhun und Lummer, Photometer von 14 Anm.
 Bunsenbrenner 135.
 Bunsensches Fettfleckphotometer 14.

 Campbell-Swinton, A. A., seine photographischen Aufnahmen mittelst Röntgenstrahlen 182.
 Cantons Leuchtstein 115, 116.
 Casciarolo von Bologna 116.
 Chemische Wirkungen der Wellen 106, 109.
 Chemi-Luminescenz 115, 116.
 Chinin, Fluorescenz des 111, 115.
 Christiansen, über anomale Dispersion 201.
 Complementär-Farben 59.
 — im hellen und im dunklen Felde 89.
 — in doppelbrechenden Prismen 97.
 Concavlinen, Zerstreuung des Lichtes durch 31.
 Concavspiegel, Reflexion durch 19.
 Contrastfarben 60.
 Contrastphotometer von Lummer und Brodhun 15.
 Convergenz des Lichtes in Folge Reflexion 19.
 — in Folge Brechung 27.
 Convexlinen, Vereinigung des Lichtes durch 31.
 Convexspiegel, Reflexion durch 21.
 Cornea des Auges 33.
 Corpusculartheorie des Lichtes 205.
 Crookes, Prof. Williams, sein Radiometer 132.
 — seine Röhre mit dem Schatten des Metallkreuzes 173.
 — seine Focusröhre 174.
 — seine Verbesserung der Vacuumpumpe 170.
 — seine Ansichten über „strahlende Materie“ 171.
 Cylinderlinen 37.

 Dauer des Lichtreizes 60.
 Davy, Sir Humphry, über Reflexion der Wärmewellen 139.
 Delezenes Polarisator 79 Anm.
 Dewar, Prof. James, über die Phosphorescenz der Körper in flüssiger Luft 118.
 Diakathodische Strahlen 220.
 Diamant polarisirt das Licht nicht 84.
 — Phosphorescenz von 115, 116.
 — Durchsichtigkeit von, gegen Röntgenstrahlen 182.
 Dichtigkeit und Brechbarkeit 36.
 Dielectrisches Medium 211.
 Differenz der Phase 89.
 Diffuse Reflexion 23.
 Dioptrie, Definition der 191.
 Dispersion des Lichtes durch Prismen 45.
 —, anomale 201.
 Divergenz des Lichtes durch Reflexion 21.
 — durch Brechung 31.
 Doppelbrechendes Prisma 77, 81.
 Doppelbrechung 77.
 Draper, über die Temperatur rothglühender Körper 141.
 Dreifarbenmethode in der farbigen Photographie 121.
 Dunkles Feld, im Polariskop 76.
 — für polarisirte Wärmestrahlen 144.

 Ebene Wellen 6.
 Ebonit, Durchsichtigkeit von, gegen Wärmewellen 145.
 — seine optischen und dielektrischen Eigenschaften 212.
 Edelsteine, optische Eigenschaften der 117, 188.
 Eis, scheinbare Strahlung von Kälte durch 137.
 Elasticität in Krystallen 83 Anm.
 Elasticitätsaxen in Krystallen 84.
 Elastische Theorie des Lichtes 204.
 Elektrische Schwingungen 151.
 — Wellen 145.
 — Funken, die durch, im Vacuum hervorgerufenen Leuchterscheinungen 167.
 Elektrischer Funken, Oscillation 147.

- Elektricität, entladen durch ultraviolettes Licht 119.
 — entladen durch Röntgenstrahlen 181.
 — entladen durch Uranstrahlen 223.
 Elektrolumineszenz 115.
 Elektromagnetische Theorie der anomalen Dispersion 203.
 — — des Lichtes 214.
 Elektroskop mit Aluminiumblättchen 181.
 — seine Entelektrisirung durch ultraviolettes Licht 119.
 — sein Gebrauch für photoelektrische Versuche 119.
 — als Anzeiger (detector) elektrischer Wellen 148.
 Elster und Geitel, über die entladende Wirkung des Sonnenlichtes 120.
 Emission des Lichtes bei verschiedenen Temperaturen 142.
 Emulsionshäute für photographische Zwecke 108.
 Entdeckung falscher Edelsteine im polarisirten Lichte 86.
 Entfernungsgesetz 12.
 Entladung durch ultraviolettes Licht 119.
 — durch Röntgenstrahlen 181.
 — durch Becquerelstrahlen 218.
 Erleuchtung einer Oberfläche 12.
 Ermüdungserscheinungen 60.
- Faraday, Prof. Michael, seine ersten Experimente in Elektro-Optik 159.
 — seine elektro-magnetische Lichttheorie 205.
 Farbe und Wellenlänge 43.
 Farbenempfindung, primäre 55.
 Farbenkreisel von Benham 62.
 — von Newton 53.
 Farbige Stoffe, gesehen im farbigen Licht 51.
 Farben, welche nicht im Spectrum vorhanden sind 56.
 — im polarisirten Licht 85.
 — dünner Blättchen 90.
 Farbenmischung 52.
 — zur Erzeugung weissen Lichtes 53.
 Filter für unsichtbares Licht 107, 145.
- Fitzgerald, Prof. George F., über die elektromagnetische Theorie der Reflexion und Brechung 212.
 — über das Fortschreiten elektromagnetischer Wellen im Aether 212.
 Fizeau, über die Anzahl der in einem Wellenzuge enthaltenen Schwingungen 71.
 Flammen, Wärmestrahlung durch 136.
 Flemming, Prof. J. A., magnetische Wirkungen auf Kathodenstrahlen 173.
 Fluoreszenz, Erscheinungen der 111.
 — Experimente über 112.
 Fluoreszenzschirme 113, 162.
 — Gebrauch der, im ultravioletten Licht 113.
 Fluoreskop 180.
 Flusspath, Durchsichtigkeit von, gegen ultraviolettes Licht 107.
 — seine Photolumineszenz (Fluoreszenz) 110.
 — seine Thermolumineszenz 118.
 Focus, reeller und virtueller 20, 30.
 — -Röhren nach Crookes 174.
 — — nach Silv. Thompson 178.
 Formeln für Brechung des Lichtes 193.
 — für Linsen 196.
 — für Reflexion des Lichtes 198.
 Foucaults Modification des Nicolschen Prismas 79 Anm.
 Fresnels Theorie des Lichtes 209, 212.
 — Ansichten in Bezug auf die Richtung der Schwingungen 212.
 Fuchsin (Rosanilin), Absorptionsspectrum von 202.
- Gallerte, Schwingungen vermittelt durch 70.
 Geisslersche Röhren 167.
 Geitel siehe unter Elster und Geitel.
 Geometrische Optik, Methoden der 187.
 Geschwindigkeit des Lichtes in Luft 1.
 Gesetz vom umgekehrten Quadrat der Entfernung 12.
 Gifford, J. W., seine Aufnahmen mittels Röntgen-Strahlen 182.
 Gitter, Beugung erzeugt durch 48.

- Gladstone, Dr. J. Hall, über die Photographie des Unsichtbaren 110.
 Glansches Nicol 78.
 Glas, Geschwindigkeit des Lichtes im 25.
 — polarisirende Eigenschaften von schlecht gekühltem 99.
 — Absorption des ultravioletten Lichtes im 108.
 — Absorption der Wärmewellen im 130.
 — Absorption der Röntgenstrahlen durch 183.
 Glätte, optische Definition von 15.
 Glimmer, die doppeltbrechenden Eigenschaften von 85, 89, 96.
 Glühkäfer, Luminescenz der 219.
 Goethes Farbentheorie 47.
 Goldstein, Prof. E., über Strahlen hinter der Kathode, welche vom Magneten nicht abgelenkt werden 221.
 Granit im polarisirten Licht 87.
 Grundempfindungen 55.
- Haidingersche Büschel** 71.
 Hartnacks Modification des Nicolschen Prismas 78.
 Heaviside, Oliver, über Fortpflanzung der Energie 212.
 Hefnerlampe 11.
 Hefnerkerze 11.
 Helles Feld im polarisirten Lichte 76.
 Helligkeit der Lichtquellen 14.
 Helmholtz, Hermann v., über anomale Dispersion 203.
 — über elektro-magnetische Lichttheorie 213.
 — Gelb und Blau giebt Weiss 58.
 Henry, Charles, Strahlen des Zinksulfats 218.
 Hering, Prof. E., seine Farbentheorie 56.
 Herschel, Sir J. W. F., über die Lage der Polarisationssebene 205.
 — Sir William, über das Wärmespectrum 133.
 Hertz, Prof. Heinrich, Entdeckung der elektrischen Wellen 146.
 — seine Oscillatoren 152.
 — über Reflexion der elektrischen Wellen 152.
- Lummer, Sichtbares und unsichtbares Licht.
- Hertz, Prof. Heinrich, Wirkungen seiner Entdeckungen 214.
 — über die Durchsichtigkeit dünner Metallbleche gegen Kathodenstrahlen 175 Anm.
 Hittorf, Prof. W., seine Röhren 171.
 — über Erscheinungen an der Kathode; Kathodenstrahlen 171.
 Hopkinson, Prof. John, über optische und elektrische Eigenschaften 212.
 Hornes Luminescenz-Substanz 117.
 Huyghens Wellentheorie des Lichtes 209.
 — Construction 200.
 Hyperphosphorescenz 218.
- Innere Total-Reflexion** 29.
 Interferenz der Wellen 8.
 — des Lichtes bringt Farben hervor 92.
 Isländischer Doppelspath 78.
 Ives' Methode der Farbenregistrirung durch Photographie 123.
 — Photochromoskop 123.
 Japanische Spiegel 38.
 Joddampf, anomale Brechung von 202.
 Johanniskäfer, Luminescenz der 219.
 Joly, Dr., Paraffinklotzphotometer von 14.
- Kaleidoskop**, das Princip vom 25.
 Kalkspath oder Isländischer Doppelspath 78.
 Kälte, scheinbare Strahlung von 137.
 Kathodenstrahlen 171.
 — neue Arten von 220.
 — magnetische Ablenkung der 174.
 Kearton, J. W., die magischen Spiegel von 41.
 Kelvin, Lord, seine Theorie des Aethers 213.
 Kerr, Dr. John, seine magneto-optischen Entdeckungen 213.
 Kirchhoff, Prof. Gustav, über den Lichtäther 204.
 König, Prof. Arthur, über totale Farbenblindheit 156.
 — über farbloses Sehen 142.
 Kohlrausch und Weber, Verhältniss der elektrischen Einheiten 211.

- Kries, Prof. J. von, seine Theorie des Sehens 142.
 Kritische Winkel, der 29.
 Krümmung der Wellenoberfläche 18.
 — die durch Linsen oder Kugel-Spiegel aufgedrückte 198.
 Kryptoskop 180.
 Krystall-Linse des Auges 33.
 Krystallo-Luminescenz 125.
 Kundt, Prof. August, über anomale Dispersion an Körpern mit Oberflächenfarben 202.
 Künstlicher Regenbogen 49.
 Kürzeste Wellen im Ultraviolett 208.
- Langley, Prof. S. P., über lange Wellen 207.
 — sein Bolometer 130.
 Längste Wärmewellen 130, 208.
 Lebedew, über kleinste elektrische Wellen 157 Anm.
 Lenard, Prof. Philipp, seine Untersuchungen über die Kathodenstrahlen 175.
 — über die photographische und die entladende Wirkung der Kathodenstrahlen 176.
 Le Roux, anomale Dispersion von Joddampf 202.
 Leuchtende Fontäne 30.
 Leuchtfarbe 116, 117.
 Lichtfontäne 30.
 Lichtgeschwindigkeit 1, 25.
 Linsenmesser 190.
 Lippmann, Prof. Gabriel, über Photographie in Naturfarben 125.
 Lodge, Prof. Oliver, sein Oscillator 153.
 — sein Apparat zum optischen Studium elektrischer Wellen 155.
 — über elektrische Schwingungen 214.
 Luft-Pumpe, die Quecksilber- 170.
 — -Thermometer, Experiment mit dem 128.
 Luminescenz 114.
 Lumineszenzschirm für X-Strahlen 161 Anm., 181.
 Lummer, Prof. Otto, über Graugluth und Rothgluth 142.
- Lummer und Brodhun, Photometer von 14.
 — und Wien, der absolut schwarze Körper von 135.
 — und Pfaundler, 9. Aufl. von Müller-Pouillet 56, 126.
- Mac Cullaghs Ansichten über die Richtung der Schwingungen 205.
 Magneto-optische Entdeckungen 209, 213.
 Marconis Telegraphie ohne Draht 154.
 Maxwell, Prof. James Clerk, über Farben-Empfindungen 55.
 — seine Vorhersagung elektrischer Wellen 159.
 — seine elektro-magnetische Lichttheorie 210.
- Michelson, Prof., über die in einem Wellenzug enthaltene Wellenzahl 71.
 Millers Grenze der kleinsten Wellen 208.
 Mischfarben 94.
 Modell, die Stokessche Theorie der Röntgenstrahlen illustrirend 185.
 — die Fortpflanzung der Hertzschen Wellen illustrirend 216.
 — für Wellenbewegungen 6.
- Monochromatische Lampe 135.
 Morton, Präsident Henry, seine Fluoreszenzfarben 112.
 Muraoko, Dr., über das Licht der Leuchtkäfer 219.
 Muybridge, über Bewegungen der Thiere 64.
- Natriumlichtquelle 135.
 Natürliche Farbenphotographie 124.
 Netzhaut des Auges 34, 142.
 Neue Art von Kathodenstrahlen 220.
 Neumann, Franz, über die Richtung der Lichtschwingungen 205, 212.
 Newtons Farbenkreisel 53.
 — Farbenlehre 47.
 — Farben dünner Blättchen 90.
 — Ringe am Newtonschen Farbenglase 90.
- Nichols u. Rubens, über längste Wellen 208.

- Nicol, William, sein polarisirendes Prisma 77.
 Nicolsche Prismen neuerer Construction 79.
- Optischer Kreis** für Demonstration der Brechung des Lichtes 28.
 Optische Illusionen 60—65.
 Ordentlicher u. ausserordentlicher Strahl bezw. Bild 78, 81.
 Ordnung Newtonscher Farben 91.
 Orthochromatische Photographie 120.
 Oscillirende Entladung 147.
 Oscillator von Hertz 152.
 — von Lodge 153.
 — von Righi 152.
- Parabolspiegel** von Hertz 152.
 — zur Demonstration der Reflexion von Wärmestrahlen 138.
 Paraffinöl, Fluorescenz von 111.
 Paschens längste Wellen 207.
 Pentadecylparaltolylketone 176.
 Perlmutter, die Farben von 49.
 Perrin, Jean, über die Brechung der Röntgenstrahlen 177.
 Petroleum, Fluorescenz von 111.
 Phasendifferenz 89.
 Phenakit, Kathodo-Luminescenz von 172.
 Phosphor, Luminescenz von 115.
 Phosphorescenz 116.
 Phosphorlicht 224.
 Photochemische Wirkungen des Lichtes 107—110.
 Photochromoskop 123.
 Photoelektrische Wirkungen des Lichtes 119.
 Photographie des Unsichtbaren 165.
 Photographische Aufnahmen mittels der Röntgenstrahlen 165.
 — Wellen 105, 120.
 Photographisches Spectrum 109.
 Photoluminescenz 115, 116.
 Photometer 11.
 — von Joly 14.
 — von Bunsen 14.
 — von Lummer und Brodhun 14.
 Pigmente schwächen das Licht 52.
- Polarisation 70.
 Polarisationsebene 74, 206.
 — elektrischer Wellen 151, 155.
 — der Röntgenstrahlen, Vermuthungen über die 177.
 — der Becquerelschen Strahlen 218.
 Polariskop, einfaches 101.
 Polarisatoren, verschiedene Formen von 78.
 Poynting, Prof. J. H., Wellenrinnen 5.
 — über die Ausbreitung elektrischer Energie 212.
 Primäre Farbenempfindungen 55.
 — Farben 55.
 Prisma, brechendes 45.
 — geradsichtiges 50.
 — von Foucault 79.
 — von Hartnack 78, 79.
 — von Nicol 77.
 — Doppelbild- 80.
 Prismatisches Spectrum 45.
 Purpur ist keine Spectralfarbe 56.
 —, Analyse von 56.
- Quarz**, Drehung der Polarisationsebene im 102.
 — seine Durchlässigkeit gegen ultraviolette Wellen 108, 132.
 — seine Durchlässigkeit gegen Wärmewellen 131.
 — Linsen und Prismen von 107.
 — Triboluminescenz von 119.
- Quecksilber-Luftpumpe 170.
- Radiation** siehe Strahlung.
 Radiometer von Crookes 132.
 Rayleigh, Lord, über Schallschatten 4.
 — über anomale Dispersion 202.
 — seine Lehre vom Schall 67.
 — über elektro-magnetische Lichttheorie 212.
 — über das Himmelsblau 212.
 — über Doppelbrechung 212.
- Reeller Brennpunkt 20.
 Regenbogen erzeugt durch Brechung 49.
 Reflexion durch ebene Spiegel 16.
 — durch Convexspiegel 21.
 — durch Hohl- oder Concavspiegel 19.

- Reflexion, unregelmässige oder diffuse 23.
 — durch vielfache Spiegel 24.
 — von Wärmewellen 139.
 — von Röntgenstrahlen, vermeintliche 177.
- Refraction des Lichtes 26.
 — anomale 201.
 — von Röntgenstrahlen, vermeintliche 177.
- Resonator von Branly 154.
 — von Hertz 148.
 — von Aschkinass 154.
 — von Marconi 154.
 — von Righi 152.
- Retina des Auges siehe Netzhaut.
- Righi, Prof. August, sein Oscillator 152.
 — sein Apparat zum optischen Studium elektrischer Wellen 156.
- Röntgen, Prof. Wilhelm Konrad 160.
 — Bericht über seine Entdeckung 160.
 — seine Röhre 176, 178.
 — seine Theorie über X-Strahlen 184.
- Röntgenstrahlen, Eigenschaften der 176 bis 181.
 — ihre Kraft alle Körper zu durchdringen 164.
 — werden nicht durch den Magneten abgelenkt 177.
 — sind keine Kathodenstrahlen 176.
 — sind kein gewöhnliches, ultraviolette Licht 184.
 — werden nicht gespiegelt 177.
 — Ausgangspunkt der 178.
 — merkwürdige seitliche Emission der 179.
 — Schatten von Knochen entworfen durch die 165.
 — Ansichten über die Natur der 184.
- Rosenroth ist keine Spectralfarbe 56.
- Rotation des polarisirten Lichtes durch Quarz und Zucker 102.
 — im magnetischen Felde 102, 209.
- Rowlandsche Gitter 23, 48.
- Rubens und Nicols längste Wellen 208.
- Rubin, echter und falscher 183.
 — seine Durchsichtigkeit gegen Röntgenstrahlen 183.
- Rumford, Graf, über Wärmestrahlung 138.
- Russel, Dr. W. J., über eine neue Art unsichtbarer Strahlen 219.
- Salicin, optische Eigenschaften von 88.
- Seifenblasen, Farben an 90.
- Sensibilisatoren 120.
- Schatten, Licht dringt ein in den 4.
 — der Schallwellen 4.
 — der Wärmewellen 140.
 — durch Röntgenstrahlen erzeugt 163.
 — durch Kathodenstrahlen erzeugt 173.
- Schallwellen, die Gestalt der 163.
- Schumanns kleinste Wellen im sichtbaren Spectrum 208.
- Schwarz ist blosse Abwesenheit von Licht 44.
- Schwarze Oberflächen absorbiren Wärmewellen und werden warm 134.
 — — strahlen besser als blanke 135.
- Schwarzes Kreuz im Polarisirkop 88.
- Schwingungsrichtung des polarisirten Lichtes 206.
- Schwingungszahl und Wellenlänge 208.
- Spannung in schlecht gekühlten Gläsern 99.
 — in gepressten Gläsern 100.
- Spectralanalyse 49.
- Spectralfarben 43, 55.
- Spectrum, erzeugt durch ein Prisma 45.
 — erzeugt durch ein Gitter 48.
 — das sichtbare 103.
 — die unsichtbaren Theile vom 105.
- Sphaerometer, das 190.
- Spiegelung 16, 19, 21, 23, 24, 139, 177 (siehe übrigens unter Reflexion).
- Sprengels Quecksilber-Luftpumpe 170.
- Standardkerze 11.
- Stehende Lichtwellen 125.
- Steinsalz, seine Durchlässigkeit gegen Wärmestrahlen 131.
- Stokes, Sir George Gabriel, seine Entdeckung in Bezug auf Fluorescenz 111.
 — kürzeste Wellen beobachtet durch 208.
 — seine Lehre über die Röntgenstrahlen 184.
- Strahlen, Nichtexistenz von 9.

- Strahlende Materie von Crookes 171.
 — Wärme 127.
 Strahlenfilter für ultraroth Wellen 145.
 Strahlung 128.
 — des schwarzen Körpers 135.
 Subjective Farben 59.
 Swanberg, Erfinder des Bolometers 130.
- Talbot, über anomale Dispersion 201.
 Temperatur, ihre Beziehung zur Lichtemission 114, 142.
 Thaumatrope 61.
 Thermoluminescenz 115, 118.
 Thermometer zur Erforschung des ultraroth Theiles des Spectrums 129.
 — Luft- 128.
 Thermosäule, Gebrauch der 129.
 Thomson, Prof. Joseph John, über das Verhältniss der elektrischen Einheiten 212.
 Totale innere Reflexion 29.
 Turmalin, optische Eigenschaften von 76.
 — Durchsichtigkeit und Leitfähigkeit von 213.
 Transversale Wellen 68.
 Triboluminescenz 115.
 Trichromatische Theorie der Farbeempfindungen 156.
 Troost, Strahlen der hexagonalen Blende 218.
 Turner, Dr. Dawson, über das Licht der Leuchtkäfer 219.
 Tyndall, Prof. John, Demonstration der Contrastfarben 60.
 — Reflexion von Wärmewellen 139.
 — über den Schall 67.
 — Vorlesungen über das Licht von 112.
 — seine Wellenfilter für ultraroth Strahlen 145.
- Ultraroth Wellen 105, 127.
 Ultraviolettes Licht 105.
 — seine chemischen Wirkungen 105.
 Unsichtbares Spectrum, ultravioletter Theil 103.
 — — ultrarother Theil 127.
 Uran, grosse Dichtigkeit und Undurchlässigkeit von 164.
 Uran-Strahlen 218.
 Uranglas, Fluorescenz von 111.
 Urannitrat, Triboluminescenz von 119.
- Vacuumröhre 217.
 Virtueller Brennpunkt 30.
- Wärmeschatten 140.
 Wärmespectrum 131, 207.
 Wärmewellen oder calorische Wellen 105, 127.
 — durch Spiegelung vereinigt 139.
 Weber, Prof. H. W., über die erste Gluth (Graugluth) leuchtender Körper 142.
 — Prof. Wilhelm u. Kohlrausch, über das Verhältniss der elektrischen Einheiten 211.
 Webster, Rt. Hon. Sir Richard 182.
 Wegdifferenz 89.
 Weisses Licht, analysirt durch Newton 47.
 — seine Zusammensetzung 47.
 Wellen auf der Wasseroberfläche 5.
 Wellenfläche 187.
 Wellenfront 16.
 Wellenlänge 5.
 Wellenmodell 6.
 Wellenteich 5.
 Wheatstone, Sir Charles, über die Fortpflanzungsgeschwindigkeit elektrischer Erregungen 211.
 Wiedemann, Prof. Eilhard, über Luminescenz 115.
 — seine Entladungsstrahlen 219.
 Wiener, Prof., Nachweis stehender Lichtwellen von 125.
 Winkelmann, Prof. A., über die Brechung von Röntgenstrahlen 177.
- X-Luminescenz 163.
 X-Strahlen (s. Röntgenstrahlen) 164.
- Young, Dr. Thomas, über Farbeempfindungen 55.
- Zenker, Dr. W., Theorie der farbigen Photographie von 125.
 Zootrop 63.

Halle a. S., Buchdruckerei des Waisenhauses.

Verlag von Wilhelm Knapp in Halle a. S.

Die Primär-Elemente.

Nach der amerikanischen Ausgabe des

Henry S. Carhart, LL. D.,

Professor der Physik an der Universität von Michigan.

Bearbeitet und erweitert von

Paul Schoop,

Doktor der Naturwissenschaften.

Mit 68 Abbildungen. — Preis Mk. 8,—.

Die Sekundär-Elemente.

Auf Grundlage der Erfahrung dargestellt

von

Paul Schoop,

Doctor der Naturwissenschaften.

Mit 23 Curven und 182 Figuren. — 3 Theile à Mk. 8,—.

Der Elektromagnet

von

Silvanus P. Thompson, D. Sec.,

Direktor und Professor der Physik an der technischen Hochschule der Stadt und Gilden von London.

Deutsche Uebersetzung von **C. Grawinkel.**

Mit zahlreichen in den Text gedruckten Abbildungen. — Preis Mk. 15,—.

Vademecum für Elektrotechniker.

Praktisches Hilfs- und Notizbuch

für

**Ingenieure, Elektrotechniker, Werkmeister,
Mechaniker u. s. w.**

Begründet von **E. Rohrbeck**, fortgesetzt von **Arthur Wilke.**

Vierte Auflage. Mit vielen Holzschnitten. Taschenformat. 1894. Preis Mk. 4,—.

Verlag von Wilhelm Knapp in Halle a. S.

Deutsche Zeitschrift
für
Elektrotechnik.

Herausgegeben

von

Arthur Wilke

in Berlin-Wilmersdorf.

Die **Deutsche Zeitschrift für Elektrotechnik** ist die einzige europäische Fachzeitschrift, welche das elektrische Bahnwesen eingehend in Theorie und Praxis berücksichtigt.

In den 4 Jahrgängen, mit welchen sie bisher erschienen ist, hat sie eine Fülle grösserer und kleinerer Aufsätze von berufenen Fachleuten als Mitarbeiter gebracht und darin technische und wirtschaftliche Fragen, welche die elektrischen Bahnen betreffen, in lichtvoller und interessanter Form behandelt.

Von fundamentalen Erörterungen wie z. B. über den prinzipiellen Werth der einzelnen Systeme bis herab auf kleine, aber wichtige Einzelheiten der Praxis hat alles, was auf diesem Gebiet Interesse erregen kann, seine Berücksichtigung gefunden.

Die Erweiterung der Zeitschrift mit dem neuen Jahre soll in erster Reihe dazu dienen, diesem grossen Gebiete der angewandten Elektricität eine vermehrte Pflege zu verschaffen, wobei insbesondere darauf Bedacht genommen wird, dass die Aufsätze auch für den Strassenbahnfachmann, welcher nicht Elektrotechniker ist, verständlich und werthvoll sind.

Der Bau, Betrieb und die Reparaturen
der
Elektrischen Beleuchtungsanlagen.

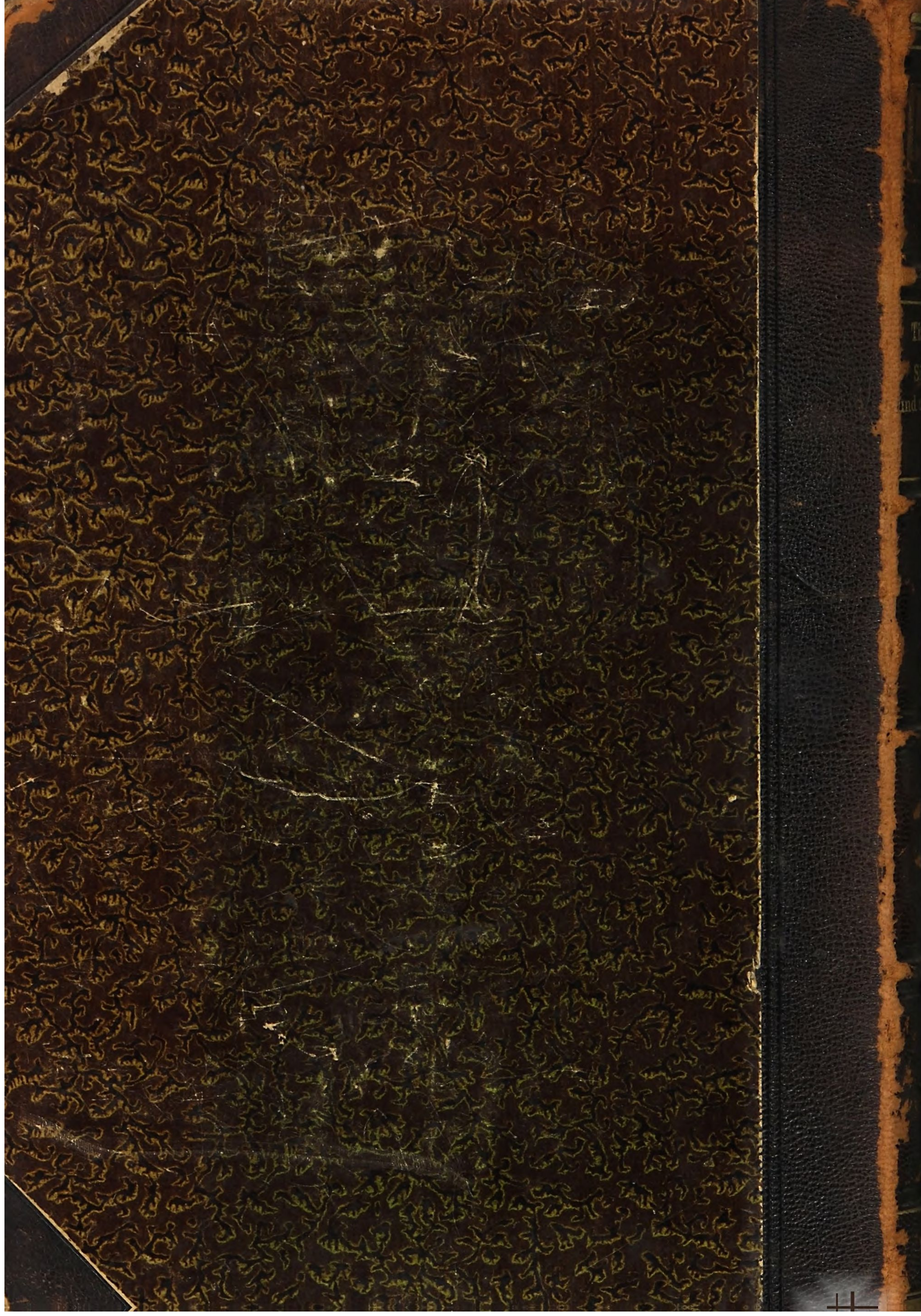
Ein Leitfaden für

Monteure, Werkmeister, Techniker u. s. w.

Herausgegeben von

F. Grünwald, Ingenieur.

Mit 302 Holzschnitten. — Sechste Auflage. — 1897. — Preis Mk. 3,—.



Thompson, Silvanus Phillips

Über sichtbares und unsichtbares Licht eine Reihe von Vorlesungen,
gehalten an der Royal Institution von Groß-Britannien

Halle a. S. 1898

Math.a. 239 d

urn:nbn:de:bvb:12-bsb11867811-8